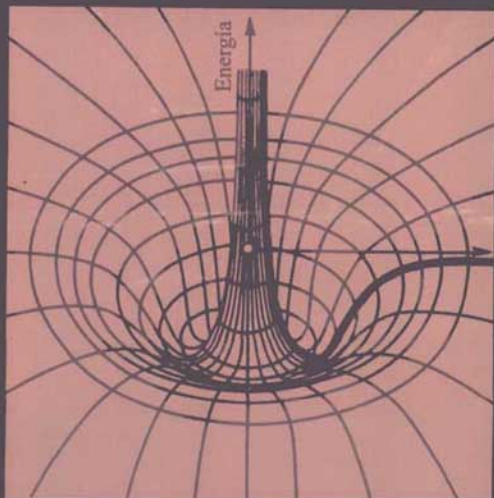

FISICA

AL ALCANCE DE TODOS

COMO SE REGISTRAN LAS PARTICULAS

A. Borovói



EDITORIAL MIR MOSCU



FISICA

AL ALCANCE DE TODOS

FISICA AL ALCANCE DE TODOS

А. А. Боровой

**КАК
РЕГИСТРИРУЮТ
ЧАСТИЦЫ**

ПО СЛЕДАМ НЕЙТРИНО

ИЗДАТЕЛЬСТВО "НАУКА"

FISICA AL ALCANCE DE TODOS

COMO SE

REGISTRAN

LAS PARTICULAS

Siguiendo la pista del neutrino

A. Borovói

*Traducido del ruso
por K. Steinberg*

EDITORIAL MIR MOSCU



Impreso en la URSS.

На испанском языке

© издательство "Наука", Главная редакция физико-математической литературы. 1981

© traducción al español. Editorial Mir. 1985

INDICE

PRÓLOGO	7
PARTE I. LAS PARTÍCULAS PASAN A TRAVÉS DE LA SUSTANCIA	9
Capítulo 1. INTERACCIONES	9
1.1. Unidad de las fuerzas de la naturaleza (9).	
1.2. Interacciones (12).	
Capítulo 2. LEYES DE CONSERVACIÓN	15
2.1. Conservación del impulso y de la energía (15).	
2.2. Conservación del momento de impulso (18).	
2.3. Algunas palabras acerca de la simetría (20).	
Capítulo 3. ELECTROMAGNETISMO Y ESTRUCTURA DEL ÁTOMO	22
3.1. Las ecuaciones de Maxwell (22).	
3.2. Descubrimiento del electrón (25).	
3.3. Ley de conservación de la carga (30).	
3.4. Átomo de Thomson (31).	
3.5. Radiactividad (31).	
3.6. Modelo del átomo de Rutherford (34).	
3.7. Átomo cuántico (35).	
Capítulo 4. HUELLAS DE LAS PARTÍCULAS CARGADAS	40
4.1. Ionización y excitación (40).	
4.2. Pérdidas por radiación (43).	
4.3. Radiación de Vavilov-Cherenkov (44).	
Capítulo 5. EL FOTÓN Y LA SUSTANCIA	48
5.1. Efecto fotoeléctrico y efecto Compton (48).	
5.2. Relación de indeterminación (49).	
5.3. Predicción del positrón (52).	
5.4. Un descubrimiento "casual" (54).	
5.5. Los rayos cósmicos y la cámara de Wilson (55).	
5.6. El positrón y los "pares" (59).	
5.7. Antimateria (61).	
Capítulo 6. EN EL SENO DEL NÚCLEO	63
6.1. Los neutrones y las fuerzas nucleares (63).	
6.2. El descubrimiento de Fermi (66).	
6.3. Los campos (68).	
6.4. Conservación de la carga bariónica (70).	
Capítulo 7. INTERACCIONES DÉBILES	72
7.1. ¿Por qué son débiles? (72).	
7.2. Enigmas de la desintegración β (73).	
7.3. Hace su aparición en escena el neutrino (74).	
7.4. Teoría de Fermi (76).	
7.5. Enrique Fermi (77).	

PARTE II. LOS DETECTORES Y EL NEUTRINO	79
Capítulo 1. MATERIALES CENTELLEANTES Y DESCUBRIMIENTO DEL NEUTRINO	79
1.1. ¿Cómo registrar el neutrino? (79).	
1.2. Reactores nucleares como fuentes de neutrinos (82).	
1.3. Un poco de historia (83).	
1.4. Cómo se transforma en luz la energía de las partículas (84).	
1.5. El contador de centelleo moderno (85).	
1.6. Material centelleante para el neutrino (89).	
1.7. Fuentes del fondo (90).	
1.8. La tan ansiada victoria (93).	
1.9. El neutrino se dispersa en el electrón (96).	
Capítulo 2. LA RADIOQUÍMICA, EL SOL Y EL NEUTRINO	100
2.1. Otra vez un poco de historia (100).	
2.2. Experimentos de Davis (103).	
2.3. Sobre el experimento con resultado negativo (105).	
2.4. Búsqueda de los neutrinos solares (108).	
2.5. El neutrino polarizado (110).	
2.6. Conservación de la carga leptónica (112).	
Capítulo 3. CONTADORES, CÁMARAS Y SORPRESAS DE LA INTERACCIÓN DÉBIL	114
3.1. Descarga de gas (114).	
3.2. Tipos de contadores de descarga de gas (115).	
3.3. Contadores para los neutrinos solares (119).	
3.4. Cámara de chispas (121).	
3.5. Hipótesis sobre dos tipos de neutrinos (123).	
3.6. Experimentos con los neutrinos en aceleradores (125).	
Capítulo 4. DESINTEGRACIÓN BETA DOBLE. CONTADORES A BASE DE SEMICONDUCTORES	129
4.1. Especialización (129).	
4.2. Cuando del núcleo salen dos electrones (131).	
4.3. Experimentos geológicos (133).	
4.4. Contador a base de semiconductores (135).	
4.5. El experimento de Fiorini (137).	
Capítulo 5. CÓMO "ESTÁ ESTRUCTURADA" LA INTERACCIÓN DÉBIL	140
5.1. Es hora de hacer balance (140).	
5.2. Interacción (141).	
5.3. Cámaras de burbujas (143).	
5.4. Corrientes neutras (146).	
Capítulo 6. NUEVAS IDEAS Y NUEVOS DETECTORES	149
6.1. ¿Oscila el neutrino? (149).	
6.2. Proyecto DUMAND (153).	
6.3. La práctica y el neutrino (156).	
Capítulo 7. UNA CONCLUSIÓN SUMAMENTE SUCINTA	159
TABLA DE LAS PROPIEDADES DE ALGUNAS PARTÍCULAS ELEMENTALES	160

PRÓLOGO

Por muy extraño que parezca, la aparición de este libro guarda relación con una novela de ciencia-ficción.

Tres cosmonautas vivían en un lejano planeta. Y se encontraron con un fenómeno extraño y aterrador: en la estación aparecieron personas salidas de sus recuerdos. Más tarde nos enteramos de que el planeta es un ente racional. Realiza experimentos con los cosmonautas como si éstos fuesen animales de laboratorio haciendo aparecer ante ellos copias de personas. Son los llamados seres F (fantasmas). Las copias están creadas con tanta perfección que los protagonistas pueden demostrar que no es sino una "falsificación" tan sólo por medio de aparatos especiales. Analizan la sangre del fantasma a nivel atómico y llegan hasta las partículas más pequeñas de las cuales ésta se compone. He aquí que los tres científicos intercambian opiniones:

- El último elemento de la estructura de nuestros cuerpos es el átomo.

- Supongo que los seres F están constituidos de partículas menores que los átomos ordinarios. Mucho menores.

- ¿De mesones?—sugirió Sartorius. Éste no quedó sorprendido, ni mucho menos.

- No, de mesones no... Más bien, de NEUTRINOS.

Tan imprudentemente conjeturó el protagonista de la novela. Imprudentemente, porque por estas palabras tuvo que pagar una persona del todo ajena.

El hecho es que en Moscú, adjunta al Instituto de Energía Atómica I. V. Kurchátov, desde 1968, funciona la Escuela de Ciencias Naturales (ECN). Su auditorio, estudiantes de secundaria, asisten por las tardes a las conferencias y toman parte en los seminarios de física, matemáticas y biología. Durante muchos años el autor del presente libro impartía en la ECN el curso de física. Junto con datos comunes y corrientes este curso debía incluir relatos acerca de la física moderna, exponiendo, además, a los oyentes cómo trabajan los físicos y cómo ponen los experimentos.

Y he aquí que al conferenciante le inundaron, literalmente, de preguntas sobre los neutrinos. ¿Qué homrecillos pueden crearse a partir de éstos? ¿Cuáles son las fuerzas que pueden retener estas partículas? ¿De dónde proviene esta palabra con su matiz cariñoso? Las preguntas llovían a centenares, de modo que la situación del autor

llegó a ser casi tan embarazosa como la de sus personajes.

Tuvo que ponerse de acuerdo que, en adelante, cuando se tratase de los métodos de investigación de la física moderna del núcleo y de las partículas elementales, todo se ilustraría basándose en los experimentos con neutrino. Poco a poco a los relatos sobre el particular se concedía un espacio cada vez mayor. Es que los principios de registro de las partículas es un terreno muy conveniente para la aplicación de los conocimientos en el campo de mecánica, electricidad y óptica obtenidos en el curso de física general.

Aunque existen decenas de buenos libros de divulgación dedicados a estos mismos temas, el parecer del autor es que a los lectores no estaría de más conocer también las conferencias en cuestión.

De lo expuesto resulta evidente que el libro que ofrecemos está destinado, en primer lugar, a los jóvenes interesados por los problemas de física nuclear y física de las partículas elementales. Y para leer este libro sin dificultad bastan los conocimientos del curso de la escuela secundaria.

A. Borovói

Parte I

LAS PARTÍCULAS PASAN A TRAVÉS DE LA SUSTANCIA

Capítulo 1

INTERACCIONES

1.1. UNIDAD DE LAS FUERZAS DE LA NATURALEZA

“La naturaleza es inagotable en su inventiva”.

“Es un milagro que a pesar de la sorprendente complejidad del mundo podemos descubrir en sus fenómenos determinada regularidad”.

A los autores de estas palabras les separan dos siglos y medio. El primero es Isaac Newton, y el segundo, uno de los fundadores de la mecánica cuántica Erwin Schrödinger.

¡Es, realmente, un milagro! A semejanza de un pintor quien al mezclar varios colores fundamentales crea en la paleta una compleja gama policroma, la naturaleza por combinación de un número pequeño de fuerzas básicas, fundamentales, alcanza una diversidad asombrosa de fenómenos. Y el científico no debe dejarse embrollar en éstos, debe separar lo importante de lo secundario e intentar hallar la base prístina del mundo. Estos intentos se remontan a la más remota antigüedad. Seis siglos antes de nuestra era el sabio griego Tales de Mileto enseñó que todo en el Universo se formó de una materia única, el agua. Le atribuyen las siguientes palabras: “El agua es el principio de todas las cosas, todo procede de ésta y en ésta se transforma”.

Con el correr del tiempo, los filósofos sustituyen una base del mundo por otra: el agua, por el aire; el aire, por el fuego. Aparecen conjeturas que se adelantaron a su época no sólo en siglos, sino en milenios.

Así, por ejemplo, los sabios de la Antigua Grecia Leucipo y Demócrito sugirieron la hipótesis sobre los átomos.

La vida y la muerte de Demócrito dio origen a leyendas en las cuales la imagen del filósofo aparece, a veces, embellecida por sus admiradores y, a veces, denigrada manifiestamente por sus adversarios.

El propio hecho de su existencia es testimonio del carácter extraordinario de la personalidad de Demócrito, así como de la

profunda impresión que dejó el filósofo en sus contemporáneos.

En este sentido, su maestro Leucipo tuvo muy poca suerte. De él no sabemos casi nada. Existían dos opiniones diametralmente opuestas: una, que la mayor parte de la teoría de Demócrito pertenecía a Leucipo y el papel del primero no fue, ni mucho menos, el más importante, y otra, que Leucipo, en general, no existió y que no es sino un personaje de las obras de Demócrito.

Los investigadores de nuestros días, en su mayoría, se atienen sabiamente a una posición mental: Leucipo sí, existió, pero no está claro qué, precisamente, se debe referir a su aporte personal a la filosofía.

Sea como fuere, se conoce que Demócrito nació en la ciudad griega de Abdera situada en la costa de Tracia, entre los años 470 y 460 a.n.e. (no lo sabemos con exactitud), es decir, casi dos milenios y medio atrás. A pesar de que su vida difícilmente puede calificarse de apacible, el filósofo alcanzó una edad venerable y murió a los ochenta, o bien, noventa años.

Se educó en casa de su padre Damasipo y, a todas luces, era un joven muy ávido de saber. A la muerte de su padre, Demócrito recibió una herencia cuantiosa y se dedicó a viajar y dondequiera que estuvo —en Egipto, Etiopía, Babilonia, Persia— enriqueció sus conocimientos. Al cabo de muchos años regresó a su casa, habiéndose gastado todo el dinero, pero, en cambio, habiendo acumulado otro caudal: la sabiduría.

“Entre todos mis contemporáneos no hubo nadie quien recorriese tantas tierras haciendo tantos estudios y observando la naturaleza, ni tampoco quien aprendiese de tantos sabios... Tan sólo en Egipto pasé cinco años”.

Demócrito se estableció en una casita junto al mismo muro de la ciudad y se pasaba el tiempo leyendo libros, conversando y meditando. Es difícil decir por qué esta ocupación inocente pareció molesta a cierta gente, pero al cabo de cierto tiempo el filósofo fue llamado a juicio acusado de “criminal demencia”. A Demócrito le inculparon el despilfarro de su dinero, el que su hacienda llegara al estado de abandono y, posiblemente, muchas otras cosas.

El filósofo se defendía hábilmente. Demostraba que las ocupaciones científicas son provechosas para todo el Estado, además como relata una de las leyendas, recibió el apoyo inesperado del gran médico de la Antigüedad Hipócrates, que por aquella época visitó la ciudad de Abdera. Hipócrates refutó la versión sobre la demencia, y por cuanto su autoridad era innegable a Demócrito le absolvieron.

Para demostrar que se encuentra en plenitud de sus facultades mentales el filósofo leyó ante el tribunal fragmentos de su libro el

"Gran Diacosmos" en el cual enunciaba, precisamente, la hipótesis atomística.

Por desgracia, aunque Demócrito creó una cantidad muy grande de obras referentes a los más diversos campos del saber, el implacable tiempo y los enemigos todavía más implacables las aniquilaron casi en su totalidad. Esta es la razón de que nos veamos obligados a obtener los datos acerca de la teoría de Demócrito de segundas manos y, en parte, incluso interpretados por sus opositores.

El filósofo enseñaba que en el mundo existen átomos y el vacío. Los átomos, partículas indivisibles de dimensiones mínimas, tienen una multitud de diversas formas. Al unirse unos con otros, éstos forman los cuerpos que nos rodean. Y no solamente los cuerpos. Todas las cosas, incluyendo el alma humana y los dioses helénicos, están constituidas por átomos. El alma, además, está tejida de partículas de fuego.

Evidentemente, el filósofo discurría mucho sobre las causas que hacen unirse los átomos y sobre cuál es el método de semejante unificación. Es natural que no pudiera imaginar un método que no fuese el puramente mecánico, y por lo tanto dotó las partículas de ganchos, grapas y cavidades.

Demócrito procuró refrendar sus razonamientos con experimentos, señalando que la compresibilidad de los cuerpos es el efecto de la estructura discontinua (discreta) de la sustancia.

Finalmente, el filósofo creó el cuadro majestuoso de la multiplicidad de los mundos que nacen, se desarrollan y mueren en el Universo infinito.

Una serie de filósofos que vivieron posteriormente—Epicuro (341—270 a.n.e.) y Lucrecio Caro (98—55 a.n.e.)—compartían y desarrollaban estas concepciones. Sin embargo, ya en la Antigüedad la doctrina de Demócrito contaba con muchos más adversarios, los cuales sostenían que la sustancia es continua y se divide hasta lo infinito, que con adeptos. Y, además, siempre se podía evocar que "hablaba sin el debido respeto de los dioses".

Transcurrieron dos mil años.

En las obras de Galileo, Kepler y Newton germinó la ciencia que hoy en día llamamos física. Se convirtió en su método principal la comprobación de los vaticinios teóricos por el experimento.

Resultó que la ciencia tuvo que rechazar prácticamente casi todas las ideas de Demócrito: la idea sobre el mecanismo de interacción de los átomos y el concepto del vacío absoluto. Hasta la propia palabra "átomo", o sea, indivisible, es errónea por cuanto a principios de nuestro siglo los científicos se convencieron de que los átomos se componían de una envoltura electrónica y el núcleo.

No obstante, su vaticinio primordial, el referente a las pequeñas partículas que portan las propiedades de la sustancia, pasó la prueba del tiempo y de la experiencia.

Mijail Lomonósov, John Dalton, Miguel Faraday, Roberto Brown, José Loschmidt, Amadeo Avogadro, Dmitri Mendeléiev, Jean Perrin, Alberto Einstein, estos y muchos otros investigadores hicieron renacer y demostraron irrefutablemente la certeza de la hipótesis atómica.

Uno de los más destacados físicos teóricos norteamericanos, R. Feynman, dijo: "Si como consecuencia de una catástrofe universal resultasen destruidos todos los conocimientos científicos acumulados y a las generaciones venideras de seres vivos llegase una sola frase, ¿cuál sería el enunciado compuesto de un número mínimo de palabras que transfiriese la información máxima? Yo considero que es la hipótesis atómica (puede llamarla no hipótesis, sino hecho, pero esto no cambia nada): todos los cuerpos se componen de átomos, pequeños cuerpecitos que se encuentran en movimiento desordenado, se atraen a una distancia pequeña, pero se repelen si uno de éstos se aprieta más densamente a otro. Esta frase... contiene una cantidad inverosímil de información sobre el mundo..."

1.2. INTERACCIONES

Retornemos ahora a los intentos de clasificar las fuerzas de la naturaleza. Ya en nuestros días se conformó la idea sobre las cuatro fuerzas fundamentales de interacción. Estas son:

1. La fuerza de la gravedad (interacción gravitacional);
2. Las fuerzas electromagnéticas;
3. Las fuerzas nucleares (interacción fuerte);
4. La interacción débil.

Por ahora no se han encontrado otros tipos de fuerzas. Todas las partículas elementales, obligatoriamente, toman parte en la interacción gravitacional. Esta es universal. Pero, a pesar de ello, de acuerdo con las concepciones contemporáneas, las fuerzas de la gravedad que responden por el movimiento de los planetas, los flujos y reflujos del Océano Mundial y la compresión de las estrellas no desempeñan papel alguno en el reino de las partículas elementales. Y la causa radica en la insignificancia de la constante en la ley de la gravitación de Newton:

$$F_{12} = \gamma \frac{m_1 m_2}{r_{12}}, \quad (1)$$

aquí r_{12} es la distancia entre los cuerpos (la fuerza tiene un aspecto tan sencillo si los cuerpos son puntuales o esféricos); m_1 y m_2 son las masas de los cuerpos, y, finalmente, γ es la constante universal igual a $6,7 \cdot 10^{-11}$ unidades SI ($\text{N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2}$).

Este valor tan pequeño de la constante γ puede ser compensado por las enormes masas de los cuerpos m_1 o m_2 . Ahora bien, las masas de las partículas elementales son extraordinariamente pequeñas.

De este modo, en adelante sólo encontraremos tres tipos de interacciones: electromagnética, fuerte y débil. Durante un período bastante largo los investigadores acumulaban hechos que testimoniaban sobre la diferencia existente entre las fuerzas fundamentales. Y esta diferencia era enorme.

Por ejemplo, si, para mayor claridad, expresamos el valor de la fuerza en cierta escala convencional de alturas, comparando las fuerzas nucleares a la altura de la Torre Eiffel, la interacción electromagnética se hallará al nivel de una casa de una planta y la débil tendrá el tamaño de un botón, nada más.

La acción de las fuerzas electromagnéticas decrece a medida que aumenta la distancia entre las cargas, pero este decrecimiento es paulatino. Por esta razón se dice que las fuerzas en cuestión son de gran alcance.

En cambio, la interacción nuclear se interrumpe bruscamente apenas la distancia entre las partículas supere 10^{-14} m, es decir, una cienmillonésima de micrón. Es todavía menor (!) el radio de penetración de las fuerzas débiles.

Al mismo tiempo, los científicos no cejaban en su intento de hallar el camino para su unificación. Para descubrir el manantial único de todas las fuerzas de la naturaleza cuyo prototipo más lejano es el agua.

Durante largos años reflexionó sobre el particular Alberto Einstein. Es de común conocimiento que los trabajos del gran físico transformaron, literalmente, la ciencia. En los primeros cuarenta años de su vida y los veinte años de su inspirada labor Einstein creó la teoría especial y general de la relatividad, y las más de las veces el nombre del científico viene relacionado con estos descubrimientos. Sin embargo, en estos años Einstein elaboró también la teoría del movimiento browniano, del efecto fotoeléctrico y muchas otras cosas.

En los primeros cuarenta años de su vida... Y téngase en cuenta que Einstein vivió 76 años.

Los últimos tres decenios los consagró a la unificación de la teoría de la gravitación y del electromagnetismo. Era una labor titánica y extenuante.

Cuando en 1933 en Alemania subieron al poder los nazis, Einstein

emigró y eligió su residencia en Norteamérica, en la tranquila ciudad universitaria de Princeton. Trabajó temiendo perder un solo día. Tenía que superar enormes dificultades matemáticas: "...los martirios matemáticos me sujetan como unas tenazas implacables, y yo no puedo librarme, no visito ningún lugar y ahorro el tiempo, postergando todo lo demás. Como usted ve, me he convertido en un tacaño. En los minutos de lucidez comprendo que esta avaricia respecto al tiempo es viciosa y necia"—escribió Einstein en una de sus cartas. Y algo más sobre lo mismo: "...las dificultades matemáticas no me permiten obtener de estas ecuaciones las deducciones que se puedan confrontar con la observación. Poca esperanza hay de que lo consiga hasta el final de mis días".

Einstein no tenía seguidores. Al principio, los físicos trataban de comprender sus artículos, luego sólo los hojearan y, por fin, meramente no los abrían. A la soledad en la vida personal se añadió la amarga soledad en la ciencia.

El físico polaco Leopoldo Infeld que trabajó cinco años con Einstein ayudándole en su labor, recuerda sus palabras:

"Los físicos me consideran un viejo necio, pero yo estoy convencido de que en el futuro el desarrollo de la física tomará una dirección distinta de aquella que siguió hasta la fecha". El camino concreto elegido por Einstein no lo condujo al éxito, mas su idea filosófica general sobre la unidad de las distintas fuerzas resultó ser justa. Hace unos dos o tres lustros los científicos encontraron el derrotero correcto. Y más tarde llegaron los verdaderos "momentos estelares" para los físicos cuando no pasaba un año sin grandes descubrimientos.

Y he aquí que en 1979 tres físicos teóricos, S. Weinberg, Sh. Glashow y A. Salam recibieron el Premio Nobel por la creación de la teoría unificada de las interacciones electromagnéticas y débiles. Actualmente, se elaboran planes de la "gran unificación" de los tres tipos de fuerzas: nucleares, electromagnéticas y débiles. Y, también, la "supergravitación" que incluye, además, en esta lista la gravitación. La teoría única de todas las interacciones de la naturaleza adquiere contornos cada vez más tangibles.

Pero no nos apresuremos. Retornaremos todavía al problema de la unidad de las distintas fuerzas, mientras que ahora vamos a conocer un poco más a fondo cada uno de los tipos de interacción con las partículas elementales que participan en ésta, así como las leyes que gobiernan los diversos tipos de fuerzas. Iniciemos este conocimiento desde las leyes de la conservación.

Capítulo 2 LEYES DE CONSERVACIÓN

2.1. CONSERVACIÓN DEL IMPULSO Y DE LA ENERGÍA

Tenemos que formar una idea de cómo las partículas elementales pasan a través de la sustancia. En este caso suceden transformaciones complejas: las partículas se dispersan, engendran partículas nuevas, destruyen átomos y núcleos, se desintegran, etc. Es aquí, precisamente, donde acuden en nuestra ayuda las leyes generales que rigen todos los procesos independientemente de su complejidad. Estas llevan el nombre de leyes de conservación.

Por ejemplo, se desintegra el núcleo del elemento pesado californio. Por supuesto que no podemos ver este proceso, sin embargo, estamos en condiciones de figurarnos cierto modelo suyo. Al principio, el núcleo comienza a cambiar su forma. Se alarga y en su interior se esbozan dos nuevas formaciones. El núcleo recuerda cada vez más una haltera. Al fin y al cabo, las fuerzas de repulsión electrostática desgarran el californio en dos partes, dos fragmentos, y éstos se alejan volando y emitiendo, además, neutrones, electrones y cuantos gamma.

¿Acaso es necesario estar al tanto de todos estos pormenores y saber describirlos en el lenguaje de las fórmulas para hallar cuál es el ángulo que forman los fragmentos del núcleo al separarse? Claro que no. La ley de la conservación del impulso nos da la posibilidad de decir inmediatamente que este ángulo es igual a 180° , es decir, los fragmentos vuelan en sentidos opuestos. También se puede evaluar la velocidad de los fragmentos si se conocen sus masas y energía desprendida durante la fisión.

Si cierta magnitud se conserva, entonces, al calcular su valor al principio del proceso y al final, se pueden igualar estas dos expresiones, obteniéndose una información interesante sobre el proceso que se desarrolla. En el curso de nuestro relato retornaremos reiteradas veces a las leyes de la conservación ampliando paulatinamente su círculo, aunque no todas éstas serán equivalentes. El lector se enterará de cómo, a resultas del deseo de salvar estas leyes, se ha inventado esta admirable partícula, el neutrino. Partícula que se convertirá en el héroe principal de este libro.

Como primera entre las leyes de la conservación fue descubierta la de la conservación del impulso (la de la cantidad de movimiento).

Hace trescientos cincuenta años, en los albores de la creación de la mecánica clásica, el filósofo francés Renato Descartes introdujo el concepto sobre la cantidad de movimiento: cierta magnitud que podría servir de medida del movimiento. El científico escribió:

"...en el Universo... hay una cantidad determinada de movimiento que nunca aumenta ni disminuye y, de este modo, si un cuerpo pone en movimiento a otro, el primero pierde tanta cantidad de movimiento cuanta transmite. Así, por ejemplo, si una piedra cae a la tierra desde un punto alto, entonces, en el caso de que ésta no rebote, sino que se detenga, admito que estremece la tierra y le transfiere su movimiento. Pero por cuanto la parte de tierra puesta en movimiento contiene, por ejemplo, mil veces más sustancia que la que encierra la piedra, resulta que, al transmitir su movimiento, ésta puede comunicar tan sólo una velocidad mil veces menor".

¿Qué sobrentendía Descartes al hablar sobre la cantidad de movimiento? Sus ideas acerca de esta magnitud eran puramente intuitivas. No obstante, basándose en estas ideas, el filósofo supo comprender una de las leyes más generales de la naturaleza. En el presente libro necesitaremos una formulación bastante sencilla de esta ley: en un sistema integrado por n cuerpos sobre el cual no actúan fuerzas exteriores se conserva la magnitud del impulso total (de la cantidad de movimiento):

$$\begin{aligned}\vec{P}_{\text{tot}} &= \vec{P}_1 + \vec{P}_2 + \dots + \vec{P}_n = \\ &= m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 + \dots + m_n \vec{v}_n.\end{aligned}\quad (2)$$

Aquí $\vec{P}_1, \vec{P}_2, \dots, \vec{P}_n$ son los impulsos de los cuerpos del sistema. Cada uno de éstos es igual al producto de la masa (m) por la velocidad (v).

Precisamente la ley de conservación del impulso permite determinar el ángulo de dispersión de los fragmentos cuando fisiona el núcleo del californio. Al principio, el núcleo estaba en reposo, y su impulso era igual a cero. Durante la fisión no actuaban las fuerzas exteriores y, por consiguiente, el impulso total de los fragmentos de masas m_1 y m_2 permaneció nulo:

$$0 = m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2.\quad (3)$$

De aquí

$$m_1 \vec{v}_1 = - m_2 \vec{v}_2.$$

Las velocidades de los fragmentos están dirigidas en sentidos opuestos y son inversamente proporcionales a sus masas. En este caso podemos no saber nada sobre el propio mecanismo de la fisión.

En cuanto a la ley de conservación y transformación de la energía ésta deparó a los científicos muchas más molestias. Fue preciso demostrar que la energía mecánica podía transformarse en otros tipos de energía, así como que eran posibles transiciones inversas, con la particularidad de que en estos casos la energía no se perdía.

En la mecánica clásica la energía se divide en dos partes. Una está relacionada con la velocidad de movimiento de los cuerpos y lleva el nombre de cinética (*Cin*), la otra, con la disposición mutua de los cuerpos en el espacio y con su interacción. Esta última se denomina energía potencial (*Pot*). Para un sistema que consta tan sólo de dos cuerpos y se encuentra lejos de otros objetos es válida la igualdad

$$E = Cin_1 + Cin_2 + Pot_{12} = \frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} + Pot_{12}. \quad (4)$$

Pot_{12} es la energía potencial de interacción de estos cuerpos; si entre los mismos actúan solamente las fuerzas de la gravedad, dicha energía es igual a

$$Pot_{12} = -\gamma \frac{m_1 m_2}{r_{12}}. \quad (5)$$

La velocidad de las partículas elementales se aproxima, con frecuencia, a la de la luz, y las fuerzas de interacción entre éstas son bastante grandes. En este caso la mecánica clásica debe ceder su lugar a la teoría de la relatividad. No relataremos (ni tampoco lo podemos hacer en este libro) con muchos pormenores sobre esta admirable teoría; sólo necesitaremos algunas de sus deducciones y, ante todo, la relación entre la masa y la energía.

En la física clásica existían dos conceptos aislados de masa y de energía, como asimismo actuaban dos leyes de la conservación de estas magnitudes. La teoría de la relatividad vinculó indisolublemente la masa y la energía, de modo que la ley de la conservación se convirtió en única.

Supongamos que dos cuerpos cuyas masas son m_1 y m_2 se atraen. Si medimos la masa de este sistema M , resultará que la última es menor que la suma aritmética de las masas: $M < m_1 + m_2$.

La magnitud

$$\Delta m = M - (m_1 + m_2). \quad (6)$$

se denomina defecto de masa. En la teoría de la relatividad se enuncia que al crearse un sistema semejante de cuerpos se liberará energía que

lleva el nombre de energía de enlace. Esta es igual a

$$\Delta mc^2 \quad (7)$$

(siendo c la velocidad de la luz igual a $3 \cdot 10^8$ m/s).

Si ahora destruimos el sistema (alejamos los cuerpos uno de otro a una distancia infinitamente grande), esto requerirá un consumo de energía igual a $-\Delta mc^2$, y la medición de las masas de los cuerpos demostrará que sus valores se hicieron iguales a m_1 y m_2 .

Aduzcamos un ejemplo de la física nuclear. El núcleo del átomo de hidrógeno pesado que lleva el nombre de deuterón (o deutón) consta de un neutrón y un protón ligados por fuerzas de atracción nucleares. La masa del neutrón constituye $1,6749 \cdot 10^{-27}$ kg, y la del protón, $1,6726 \cdot 10^{-27}$ kg; ahora bien, la masa del deutón es de $3,3434 \times 10^{-27}$ kg; si realizamos los cálculos convenientes resulta que $\Delta m = -4 \cdot 10^{-30}$ kg. Debido a ello, para destruir el núcleo en cuestión es necesario consumir una energía de $\Delta m \cdot c^2 = 3,6 \cdot 10^{-13}$ J. Si el defecto de masa de un sistema de partículas es positivo, éste se desintegra espontáneamente, y la energía de enlace se consume en la energía cinética de movimiento de las partes que se dispersan, como hemos visto en el caso de la fisión del californio en dos fragmentos.

2.2. CONSERVACIÓN DEL MOMENTO DE IMPULSO

Sobre el hielo liso da vueltas una patinadora. Al principio su rotación es lenta, con los brazos ampliamente abiertos, a continuación, los aprieta contra el cuerpo y su rotación se acelera. Cada uno de nosotros observó decenas de veces este fenómeno, pero, ¿sabe usted cómo explicar el aumento de la velocidad de rotación? Es que, además del rozamiento contra el hielo y el aire que retardan paulatinamente el movimiento, la deportista no experimenta la acción de ninguna otra fuerza exterior.

Las reflexiones ulteriores nos llevarán a la deducción de que en la naturaleza debe existir una ley que podría llamarse de la "conservación de la cantidad de rotación". Semejante ley existe, en efecto, pero se denomina ley de la conservación del momento de impulso.

¿Qué es el "momento de impulso"?

Figurémonos una bolita que se mueve por una circunferencia sobre un plano horizontal liso. La bolita está atada con un hilo de longitud R a un alfiler clavado en el centro de la circunferencia. La magnitud

$$L = mv \cdot R, \quad (8)$$

donde m es la masa de la bolita, y v , su velocidad, se denomina momento de impulso respecto al eje de rotación (del alfiler).

Si las fuerzas exteriores no aceleran la bolita y no frenan su movimiento, la magnitud L queda constante. Este hecho puede observarse cuando el hilo se arroja al alfiler. En este caso R disminuye y v , en correspondencia, aumenta.

Lo mismo sucede con la patinadora. A medida que aproxima los brazos al cuerpo, cambia la distribución de las masas, disminuye su distancia efectiva hasta el eje de rotación. Como resultado, debe aumentar la velocidad de rotación.

La ley de la conservación del momento de impulso es universal en el mismo grado que las leyes de la conservación del impulso y energía. Sus efectos se manifiestan por doquier: desde el micromundo hasta las galaxias. Citemos otro ejemplo de tal acción, que atañe a la mecánica celeste.

El movimiento de los planetas está sujeto a las leyes de Kepler, leyes que este ilustre hombre de ciencia formuló basándose en observaciones astronómicas de muchos años. Las leyes enuncian que los planetas se mueven por elipses en uno de cuyos focos se encuentra el Sol. Una elipse está representada en la fig. 1. Sus focos son S (Sol) y F . El radio vector trazado del Sol al planeta P (r_1 y r_2 en la fig. 1) describe las mismas áreas ($S_1 = S_2$) en los mismos tiempos (Δt). Esta última afirmación se desprende de la ley de la conservación del momento de impulso. En efecto, el planeta en intervalos de tiempo iguales, recorre en un caso el arco l_1 , y en el otro, l_2 . Si tomamos Δt pequeño, los arcos pueden sustituirse por segmentos de una recta. De acuerdo con la ley de Kepler las áreas de dos triángulos $r_1 l_1 / 2$ y $r_2 l_2 / 2$ son iguales:

$$r_1 v_1 \Delta t = r_2 v_2 \Delta t$$

y

$$r_1 v_1 = r_2 v_2.$$

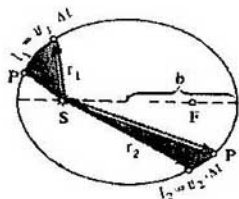


FIG. 1. El Sol y el planeta que se mueve por una elipse.

Multipliquemos ambos miembros de esta igualdad por la masa del planeta m . La magnitud $L = m x_1 v_1 = m x_2 v_2$, es decir, el momento de impulso del planeta quedará constante. Como resultado de ello, en la proximidad del Sol el movimiento es más rápido, y lejos del Sol, más lento.

2.3. ALGUNAS PALABRAS ACERCA DE LA SIMETRÍA

Cuando un objeto, después de realizar ciertas traslaciones, vuelve a adquirir su aspecto inicial se dice que es simétrico. Como patrón de simetría siempre sirvió la esfera. Cualquiera que sea la rotación que le comuniquen alrededor de su centro, nada cambiará. También las ecuaciones pueden ser simétricas si después de cierta transformación de las magnitudes que las integran su aspecto no cambia.

Tomemos a guisa de ejemplo la ecuación principal de la mecánica clásica, la segunda ley de Newton:

$$\vec{F} = m\vec{a}.$$

No es difícil cerciorarse de que esta ecuación "no reaccionará" si trasladamos el origen de coordenadas. En efecto, la fuerza depende de la disposición recíproca de los cuerpos, la aceleración viene relacionada con la variación de la velocidad y la masa permanece invariable. De este modo, la ecuación del movimiento es simétrica respecto a la traslación en el espacio.

Por primera vez, los físicos comenzaron a interesarse por los problemas de simetría cuando procedieron al estudio de la estructura de los cristales, cosa que sucedió hace unos ciento cincuenta años. En los últimos años todas las teorías de las partículas elementales y de las interacciones fundamentales se apoyan en unos principios determinados de la simetría existente en la naturaleza. Pero ya con anterioridad a este último período, en 1918, Emmy Neether, la cual, según palabras de Einstein, "formaba parte de los más destacados y pletóricos de espíritu creativo genios de la matemática" demostró el teorema que relacionó las leyes de la conservación y las propiedades del espacio y el tiempo.

No hay ni un solo intervalo de tiempo que tenga ventaja frente a otro. Esto significa que el experimento realizado hoy día y el repetido mañana, en igualdad de condiciones, dará el mismo resultado. El desplazamiento del tiempo en cierto intervalo Δt no repercutirá, de ningún modo, en las leyes físicas. Esta propiedad de la simetría del tiempo los físicos la expresan con una palabra: el tiempo es *homogéneo*.

Emmy Neether demostró que tal simetría del tiempo conduce a la ley de la conservación de la energía.

De la misma forma la ley de la conservación del impulso se basa en la *homogeneidad* del espacio. Si trasladamos una instalación en el espacio, los resultados del experimento no cambiarán.

Finalmente, la ley de la conservación del momento de impulso guarda relación con una propiedad de la simetría del espacio llamada *isotropía*. Esta propiedad significa que al girar un sistema en el espacio alrededor de cierto punto los fenómenos físicos que transcurren en aquél no varían.

El famoso teorema de Neether es bastante complicado y no podemos ofrecer aquí ni siquiera su exposición simplificada. Pero éste es uno de los enunciados trascendentales de toda la física que relaciona la simetría de las interacciones con las leyes de la conservación.

Como veremos en las páginas que siguen, precisamente el neutrino fue la partícula que planteó ante los científicos el difícilísimo problema relacionado con la simetría de los mundos nuestro y especular. Y la solución de este problema llevó al derrumbamiento de una de las más importantes leyes de la conservación.

Capítulo 3

ELECTROMAGNETISMO Y ESTRUCTURA DEL ÁTOMO

3.1. LAS ECUACIONES DE MAXWELL

El 1 de octubre de 1931, en la Abadía de Westminster donde se encuentra el panteón de los hombres a quienes, con frecuencia, se aplica el epíteto Grande, cerca de la tumba de Isaac Newton se reunieron los más destacados físicos de nuestro siglo. El lector más de una vez verá sus nombres en las páginas de este libro: Max Planck, Ernesto Rutherford, Niels Bohr, Joseph John Thomson. Los científicos se congregaron junto a las placas conmemorativas que acababan de instalar para honrar la memoria de los fundadores de la teoría del electromagnetismo: Miguel Faraday y James Maxwell.

Un siglo antes de esta fecha, al cabo de una labor larga y tenaz, Faraday descubrió la ley de la inducción electromagnética. También en 1831, en la ciudad escocesa de Edimburgo nació aquel quien supo concentrar las ideas de Faraday en la forma rigurosa de ecuaciones matemáticas, ecuaciones de Maxwell.

La suerte no le deparó una vida larga. Y ésta no rebosaba de acontecimientos espectaculares, pero en lo que se refiere a la física, su vida "corría cual un torrente tempestuoso y potente cuya profundidad estaba muy lejos de medirse de una vez" (J. J. Thomson).

Las ecuaciones de Maxwell son cuatro. Y éstas encierran la totalidad de los fenómenos eléctricos y magnéticos y toda la electrodinámica clásica que fue formándose en el siglo XIX.

Sin embargo, Maxwell no se limitó a la simple descripción matemática de hechos ya conocidos. El científico captó la profunda ligazón existente entre la electricidad y el magnetismo y añadió en una de las ecuaciones un término que lleva el nombre de "corriente de desplazamiento". Esta adición (muchos habrían dicho "arbitraria" porque nadie había observado aún el fenómeno físico correspondiente) llevaba implícitas unas consecuencias de muy largo alcance.

Apareció la solución de ecuaciones que define los campos eléctrico y magnético existentes en el espacio vacío sin cargas ni corrientes. Este campo electromagnético único se propaga en forma de onda a la velocidad de la luz c .

Con anterioridad a los trabajos de Faraday y Maxwell en la física existían tres campos diferentes: electricidad, magnetismo y óptica. El descubrimiento por Faraday de la inducción electromagnética abrió

el camino para la unificación de los dos primeros campos. Pero a él no le dio tiempo realizar su deseo recóndito: "magnetizar y electrizar el rayo de luz e iluminar la línea de fuerza magnética". Se hicieron tan sólo los primeros pasos *).

Maxwell, en sus ecuaciones, unificó definitivamente la electricidad y el magnetismo y demostró que éstos acusan la misma naturaleza. No son sino aspectos diferentes de la interacción electromagnética única. En cuanto a la luz, ésta representa una onda electromagnética, y las propiedades ópticas del medio se determinan por sus propiedades electromagnéticas.

Varios años después de la muerte de Maxwell, Heinrich Hertz en una serie de brillantes experimentos demostró la existencia de ondas electromagnéticas.

Muchos científicos hicieron su aporte a la formulación definitiva de las ecuaciones de Maxwell, así como a sus soluciones para una serie de casos concretos. En primer término, debe mencionarse Hendrik Antoon Lorentz. El científico holandés examinó la aplicación de la teoría a los sistemas integrados por cargas aisladas y campos electromagnéticos.

Así, por ejemplo, se demostró que una carga en movimiento emite ondas electromagnéticas. Solamente es necesario que dicha carga se mueva con aceleración, puesto que la intensidad total de la emisión es proporcional a $q^2 a^2$, donde q es la magnitud de la carga, y a , su aceleración. Si la carga oscila (semejante carga se denomina, con frecuencia, "oscilador"), de modo que su desplazamiento x a partir de la posición de equilibrio depende del tiempo t conforme a la ley

$$x = x_0 \sin \omega t, \quad (9)$$

siendo x_0 la amplitud, y ω , la frecuencia circular relacionada con la frecuencia ordinaria ν y el periodo de oscilación T por medio de la expresión $\omega = 2\pi\nu = 2\pi/T$, entonces, la intensidad de la emisión es proporcional a la cuarta potencia de la frecuencia, y la longitud de las ondas emitidas es

$$\lambda = cT = \frac{c}{\nu}. \quad (10)$$

* En 1846 Faraday descubrió que el campo magnético influye en el paso a través de la sustancia del rayo polarizado de luz. En 1938 fue encontrada casualmente una carta de Faraday escrita por éste "para ser guardada en un sobre sellado en los archivos de la Sociedad Real". La carta permaneció allí cerca de cien años. En la misma Faraday predijo la naturaleza electromagnética de la luz.

Actualmente, las ondas electromagnéticas se han investigado en un diapasón amplísimo. Éste se extiende desde decenas de kilómetros (ondas radioeléctricas largas) hasta 10^{-14} m (rayos gamma duros, es decir, rayos gamma de gran energía que nacen en las entrañas de los núcleos atómicos). La fig. 2 presenta la escala de ondas y las denominaciones de sus distintos sectores. Por supuesto, que no se puede trazar entre éstas una divisoria precisa, y la radiación dura de rayos X puede tener una longitud de onda menor que los cuantos gamma blandos. Sin embargo, la escala insertada ofrece el cuadro cualitativo de la naturaleza de la radiación electromagnética. Y en lo que respecta a la luz visible, ésta ocupa una parte ínfima del diapasón total, de modo que, para aumentar artificialmente la escala, hubo que dibujar aquí, en este punto, una lupa.

La gravitación responde del comportamiento de los objetos cósmicos. Este es su reino. En cambio, cuando penetramos en el seno de la sustancia, resulta que en los niveles molecular y atómico imperan indivisiblemente las fuerzas electromagnéticas.

La mecánica clásica en conjunto con la teoría clásica del electromagnetismo no se vio con capacidad de describir los fenómenos atómicos. Este problema lo resolvió la mecánica cuántica creada a principios de nuestro siglo.

Las ecuaciones del electromagnetismo también se sometieron a la reelaboración cuántica; fue creada la teoría de los campos cuantificados. Mas por mucho que creciese el edificio, su fundamento seguían siendo las ecuaciones de Maxwell. El destacado físico norteamericano

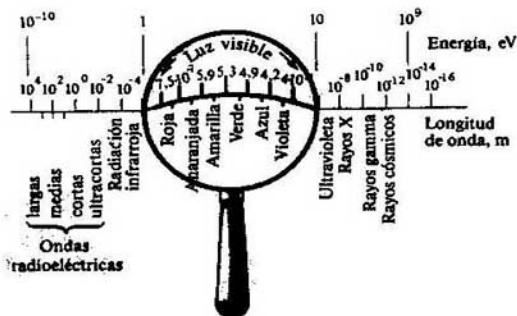


FIG. 2. Escala de las ondas electromagnéticas.

R. Feynman, laureado con el Premio Nobel por los trabajos en el campo de la teoría cuántica del campo, escribió:

“En la historia de la humanidad (si la miramos, digamos, dentro de diez mil años) el acontecimiento más significativo del siglo XIX será, indudablemente, el descubrimiento por Maxwell de las leyes de la electrodinámica. Sobre el fondo de este descubrimiento científico trascendental la Guerra de Secesión en Norteamérica, que tuvo lugar en la misma década, parecerá un incidente provincial poco importante”.

3.2. DESCUBRIMIENTO DEL ELECTRÓN

Cuando Maxwell escribió sus ecuaciones, la naturaleza de la electricidad parecía aún enigmática. No se conocía nada sobre la carga mínima y sobre sus portadores, las partículas elementales. El propio Maxwell utilizó como uno de los modelos la idea sobre el líquido elástico que llena por completo el espacio. A este líquido le dieron el nombre de éter, relacionando con su desplazamiento todos los fenómenos eléctricos y magnéticos. No obstante, la forma de las ecuaciones no dependía de la elección del modelo. No se modificaban aun cuando resultase que la carga es trasladada por partículas aisladas como lo suponía Faraday basándose en sus experimentos de electrólisis. La solución del problema sobre la naturaleza de la electricidad llegó en el momento en que fue descubierta la primera partícula elemental, el electrón.

El fin del siglo diecinueve es sorprendente en cuanto a sus descubrimientos en el ámbito de física. Cada año ante los científicos surgen nuevos campos cuyo enorme alcance se comprenderá mucho más tarde.

Año 1895: Guillermo Conrado Roentgen descubre los rayos X (ahora los llaman también rayos Roentgen).

Año 1896: Enrique Becquerel, profesor de química en París, descubre la radiactividad.

Año 1897: J. J. Thomson halla las demostraciones experimentales decisivas que confirman la existencia del electrón.

Y para no herir al entrante siglo veinte, el 14 de diciembre de 1900 Max Planck, en su informe ante la Sociedad Física Alemana, por primera vez introduce en la física el concepto de “cuanto”.

J. J. Thomson fue profesor del Laboratorio de Cavendish, tercero desde su fundación, después de Maxwell y Rayleigh; su aportación al estudio de los procesos oscilatorios fue enorme. El cuarto profesor fue Ernesto Rutherford, un físico que sobresalía incluso al lado de sus grandes precursores.

A los experimentos de Thomson precedió una labor de casi cuarenta años de duración de físicos de diferentes países encaminada a estudiar los rayos catódicos que se engendran durante la descarga eléctrica en gases enrarecidos. No profundizaremos en la historia de estos trabajos, examinando tan sólo la situación que se conformó para el año 1894, cuando Thomson comenzó sus experimentos.

Esta situación presentaba el siguiente aspecto:

1. Si a través de un gas enrarecido (en una serie de experimentos la presión de éste constituía una 10^{-5} parte de la atmosférica) ubicado en un tubo de vidrio soldado con dos electrodos introducidos en éste se deja pasar corriente eléctrica, el electrodo negativo (el cátodo) emitirá rayos a consecuencia de los cuales el vidrio en torno al electrodo positivo (el ánodo) centelleará con luz verde.

2. Los físicos aprendieron a tratar estos rayos con bastante soltura: hacerlos pasar a través de ranuras, doblar tubos de tal manera que la mancha luminosa cayese en una pared determinada, etc. Estos experimentos demostraron que los rayos catódicos se propagan en línea recta.

3. Los rayos se desviaban por un campo magnético de una forma tal como si éstos fuesen portadores de carga negativa. Al mismo tiempo, en el campo eléctrico dichos rayos, por lo visto, no se desviaban.

4. Las propiedades de los rayos no dependen del material del cátodo. Los rayos se emitan perpendicularmente al cátodo, de modo que si este último se hiciese en forma de copa, los rayos podrían concentrarse en un foco. El haz de rayos enfocado calienta al rojo la hoja metálica introducida en el tubo.

Para explicar la naturaleza de este fenómeno se proponían diferentes hipótesis, dos de las cuales obtuvieron el mayor reconocimiento.

W. Crookes, A. Schuster y otros investigadores que, en su mayoría, trabajaban en Inglaterra suponían que los rayos catódicos son un flujo de moléculas que chocaron contra el cátodo y adquirieron de éste electricidad negativa. Después de cargarse de tal forma deben ser repelidos del cátodo y volar acelerándose gradualmente hacia el ánodo.

También se promovía otro punto de vista de acuerdo con el cual los rayos no son sino fragmentos de moléculas del gas cargados. Los fragmentos positivos se captan por el cátodo, y los negativos se dirigen al ánodo. Para estos "átomos de electricidad negativa" se introdujo un nombre especial, los llamaron electrones (Stoney, 1891).

Científicos alemanes encabezados por H. Hertz consideraban que los rayos catódicos representan un nuevo tipo de ondas elec-

tromagnéticas que se desvían en el campo magnético (a diferencia de la luz ordinaria). Corroboraban sus argumentos con una serie de experimentos, el más convincente de los cuales estaba relacionado con el paso de los rayos catódicos a través de hojas metálicas delgadas. Semejante cosa se descartaba para las moléculas o los átomos pero podía tener lugar para la radiación electromagnética.

Thomson comenzó sus experimentos en el momento en que, al parecer, la mole de información contradictoria requería una detallada comprobación e intelección. Sin embargo, el científico necesitó menos de tres años para, mediante una serie de experimentos precisos y orientados a un determinado fin, resolver los problemas controvertibles y fundamentar la sorprendente conclusión sobre la existencia en cada uno de los átomos de partículas ligeras cargadas. En la actualidad, al leer la descripción de estos experimentos, uno piensa involuntariamente que Thomson estaba enterado del resultado final.

El primer experimento fue realizado en 1894. En éste se determinaba la velocidad de propagación de los rayos catódicos, resultando que es mucho menor que la de la luz: $v = 2 \cdot 10^5$ m/s. Este hecho testimoniaba a favor de la teoría corpuscular y preparó el terreno para los consiguientes trabajos. (Más tarde, por cierto, se averiguó que el valor numérico de la velocidad en este experimento había sido rebajado. El propio Thomson descubrió el error al cabo de dos años, pero no pudo determinar la causa del mismo.)

Pasemos ahora a las investigaciones de los años 1896-1897 las cuales, precisamente, llegaron a ser la prueba decisiva de la existencia de la primera entre las partículas elementales. Sólo nos detendremos en uno de la serie de experimentos. En primer término, éste puso de relieve el hecho de que el campo eléctrico, a pesar de todo, desvía los rayos catódicos. Meramente, en los experimentos anteriores de Hertz la intensidad de los campos empleados no era suficiente, como tampoco eran lo suficientemente altos los enrarecimientos practicados. En el experimento de Thomson se aplicaba también el campo magnético. Esta es la razón de que para describir el experimento sea preciso, al principio, examinar cómo se mueven en estos campos las cargas.

Sobre la carga q que vuela con la velocidad $\vec{v}$ en el campo eléctrico $\vec{E}$ actúa la fuerza

$$\vec{F}_e = q\vec{E}, \quad (11)$$

y en el campo magnético $\vec{B}$, la fuerza

$$\vec{F}_m = q[\vec{v}, \vec{B}]. \quad (12)$$

La expresión $[\vec{v}, \vec{B}]$ lleva el nombre de producto vectorial de los vectores $\vec{v}$ y $\vec{B}$, y éste debe comprenderse de la siguiente forma: el módulo $\vec{F}_m$ es igual al producto de los módulos de los vectores $\vec{v}$ y $\vec{B}$ por el seno del ángulo entre éstos:

$$|\vec{F}_m| = q |\vec{v}| \cdot |\vec{B}| \sin(\widehat{\vec{v}, \vec{B}}),$$

y la dirección de $\vec{F}$ es perpendicular al plano en que se encuentran $\vec{v}$ y $\vec{B}$ y se halla de acuerdo con la regla de la mano izquierda.

La fuerza $\vec{F}_m$ se denomina, con frecuencia, fuerza de Lorentz.

Analicemos ahora a qué conduce la acción de estos campos.

Comencemos por el problema (muy conocido) cuando la carga q , de masa m y velocidad v_0 , entra volando en el intervalo entre dos placas cargadas hasta el potencial u . La longitud de las placas es l . El campo en su interior es homogéneo y los efectos de frontera pueden ser despreciados. (Esto significa que la distancia d entre las placas debe ser mucho menor que la longitud l .) En el momento inicial $v_0 \parallel l$.

Halleemos la desviación de la carga Δy (fig. 3). El tiempo del movimiento en el campo $t = l/v_0$. El desplazamiento $\Delta y = at^2/2$, donde $a = F/m = qE/m = qu/md$. De aquí

$$\Delta y = \frac{qu l^2}{2mdv_0^2}. \quad (13)$$

Si se conocen Δy , u , d , l y está determinada la velocidad de la carga v , se puede hallar la relación q/m .

Para el campo magnético también analicemos un caso simple cuando la carga entra volando en el campo homogéneo $\vec{B}$ y $\vec{v}_0 \perp \vec{B}$. Entonces $F_m = qv_0B$, y esta fuerza hace que la carga se mueva por una circunferencia cuyo radio se determina a partir de la ecuación $F_m =$

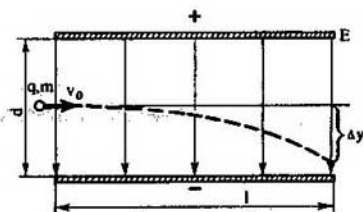


FIG. 3. Movimiento de la carga en un campo eléctrico homogéneo.

$= F_{cp}$ (fuerza centripeta):

$$\frac{mv_0^2}{R} = qv_0B, \quad R = \frac{m}{q} \frac{v_0}{B}. \quad (14)$$

La medición del radio de giro vuelve a proporcionar información sobre q/m , cuando se conoce la velocidad de la partícula.

Figurémonos ahora que la partícula va a parar a los campos $\vec{E}$ y $\vec{B}$ mutuamente perpendiculares, de modo que las fuerzas eléctrica y magnética actúen sobre ésta en direcciones opuestas.

En este caso, eligiendo los campos, se puede conseguir que en la región donde éstos se cruzan $|\vec{F}_m| = |\vec{F}_{el}|$, y la carga no se desvía.

$$qE = qvB, \quad v = E/B. \quad (15)$$

es decir, se puede determinar la velocidad de la partícula y, después, también la relación e/m .

En uno de sus experimentos Thomson hizo uso de esta circunstancia. El haz de rayos catódicos pasaba entre las placas, incidiendo sobre la escala graduada en la pared de la ampolla (fig. 4). Se podía actuar sobre este haz tanto con el campo eléctrico $\vec{E}$, como con el magnético $\vec{B}$ perpendicular al primero. En ausencia de los campos se marcaba la división de la escala en que incidían los rayos (división cero). Seguidamente, se conectaba el campo magnético y por el desplazamiento se hallaba el radio R (véase (14)). Eligiendo el potencial u entre las placas de tal modo que el haz coincidiera de nuevo en la división cero, se puede determinar la velocidad de las partículas v (véase (15)). Por fin, resolviendo conjuntamente las ecuaciones (14) y (15), Thomson determinó la magnitud q/m (por supuesto, describimos sólo la idea del experimento, omitiendo muchos detalles cuya consideración fue necesaria para obtener el resultado). La relación entre la carga y la masa resultó ser igual a $\sim 10^{11}$ C/kg; en otros experimentos Thomson obtuvo valores próximos a éste.

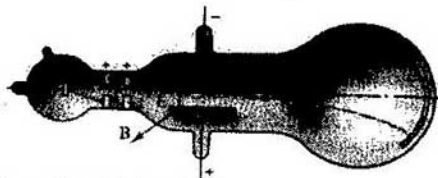


FIG. 4. Tubo catódico utilizado en los experimentos de J.J. Thomson.

En su artículo publicado en la revista "Philosophical Magazine" en 1897 Thomson compara el valor obtenido para esta relación con $q/m = 10^8$ C/kg para el más ligero entre los objetos atómicos conocidos en aquella época, el ion hidrógeno. Thomson escribe: "Esta diferencia puede estar relacionada con la pequeña masa de las partículas de los rayos catódicos m , o con el gran valor de la carga, o bien, simultáneamente, con lo uno y con lo otro". Seguidamente, basándose en los experimentos relacionados con el paso de rayos catódicos a través de hojas metálicas finas Thomson llega a la conclusión de que las partículas deben poseer precisamente una masa pequeña (dimensiones pequeñas). De este modo, "los rayos catódicos representan un estado nuevo de la sustancia sustancialmente distinto del gaseoso ordinario".

Más tarde, en la serie de experimentos realizados en 1899 Thomson demuestra que tanto las partículas arrancadas de los metales por los rayos ultravioleta (efecto fotoeléctrico), como las emitidas por los metales incandescentes (emisión termoelectrónica) tienen la misma relación e/m que los rayos catódicos. Lo confirman también otros físicos. En resumen, se llega a la conclusión de que *las pequeñas partículas cargadas negativamente son parte integrante de cualquier átomo, el cual puede perderlas en determinadas condiciones*. Para nombrar estas partículas resultó útil la palabra inventada antes: electrón.

Transcurren años, viene acumulándose el material experimental, y en los experimentos mucho más exactos se determina la relación q/m para el electrón y el propio valor de su carga designada con la letra e . Actualmente, en las tablas se insertan los siguientes valores:

$$e = -1,60218 \cdot 10^{-19} \text{ C}, \quad m = 9,1095 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \quad (16)$$

y, respectivamente, $e/m = 1,7588 \cdot 10^{11}$ C/kg.

3.3. LEY DE CONSERVACIÓN DE LA CARGA

Cualesquiera que sean las transformaciones que tienen lugar en el sistema de partículas elementales y cualesquiera que sean las fuerzas actuantes, su carga total permanece invariable. A diferencia de la masa ésta no depende ni de la velocidad ni del sistema de referencia. Dicha ley de la naturaleza lleva el nombre de *ley de conservación de la carga eléctrica* (LCC). Al igual que todas las leyes de conservación esta última está relacionada con una simetría determinada: la de las ecuaciones de electrodinámica.

También el problema de la estabilidad de los electrones se encuentra en dependencia directa respecto a la conservación de la

carga. El electrón es la más ligera de las partículas cargadas conocidas, pero podría desintegrarse en cuantos gamma y neutrino, lo que está prohibido por la ley de conservación de la carga eléctrica. De este modo, de conformidad con los últimos datos, el tiempo de vida ^{*)} del electrón supera los 10^{22} años.

3.4. ATOMO DE THOMSON

Después del descubrimiento del electrón, Thomson propuso el modelo del átomo. Según las palabras de su pequeño hijo (quien más tarde también llegó a ser un científico relevante) este modelo recordaba un budín con pasas. Las pasas eran los electrones flotando en el líquido cargado positivamente, el cual, precisamente, hacía las veces de masa. En su totalidad el átomo debía ser neutro. El modelo poseía tanto muchas ventajas, como muchos defectos. Por ejemplo, resolvía ingeniosamente el problema de la emisión por el átomo de ondas electromagnéticas. Para lograr que el electrón comience a oscilar e irradiar, es necesario que, durante su desviación de la posición de equilibrio, sobre la partícula actúe una fuerza de retorno proporcional al valor de la desviación, o sea, una fuerza semejante a la de elasticidad de un muelle estirado. Pero, ¿de qué manera puede conseguirse una cosa así? Las fuerzas coulombianas ordinarias dependen de la distancia como $1/r^2$. Aquí es donde surgió precisamente la necesidad de una esfera líquida uniformemente cargada en la cual la desviación respecto al centro provoca la aparición de una fuerza de retorno proporcional a la desviación.

El defecto más importante resultó ser la naturaleza absolutamente falta de claridad del líquido cargado. Existían, además, otras dificultades, de modo que, conforme a los recuerdos de los contemporáneos, este modelo despertó un "entusiasmo" sumamente reservado incluso en su propio autor.

3.5. RADIATIVIDAD

Resumiendo, podemos decir que para descubrir el enigma del átomo no es suficiente tener conocimiento de la existencia del electrón. Es indispensable hallar el método y el instrumento con cuya ayuda se podría penetrar al interior del átomo, como realizando el "sondeo" del mismo. Los físicos obtuvieron este instrumento después

^{*)} El tiempo de vida es el tiempo al cabo del cual, con una probabilidad $\approx 0,63$, el electrón debería desintegrarse.

del descubrimiento de la radiactividad. He aquí cuáles fueron los primeros pasos en este terreno nuevo:

Año 1896: el científico francés Enrique Becquerel descubre un tipo insólito de radiación. Esta es emitida por sales de uranio y vela la placa fotográfica a través del papel negro. Pronto, esta radiación recibió el nombre de *radiactividad natural*.

El trabajo abnegado de otros dos científicos franceses, los esposos Marie y Pierre Curie, permitió ampliar la lista de los elementos radiactivos. Se añadieron al uranio el torio, el polonio y el radio. Paralelamente al descubrimiento de nuevas fuentes de radiactividad natural se llevaba a cabo la investigación de la naturaleza de la propia radiación (Becquerel, P. y M. Curie, Rutherford, Villard y otros).

Los científicos notaron que los "rayos de Becquerel" no son homogéneos. Estos se componían de tres tipos de radiación y se comenzó a designar estos tipos con las primeras letras del alfabeto griego.

Rayos α . Se desvían débilmente por el campo magnético, pero, en cambio, son absorbidos fuertemente por la sustancia. Por ejemplo, una hoja de papel resulta para éstos absolutamente opaca.

Rayos β . Se desvían con mayor fuerza por el campo magnético, mas, a diferencia de los primeros, poseen mayor capacidad de penetración. Para retenerlos se requeriría una pila de papel.

Rayos γ . Esta es la más penetrante de todos los tipos de radiación. El campo magnético no le produce "impresión alguna".

Ya en el primer decenio que siguió tras el descubrimiento de Becquerel los físicos lograron esclarecer la naturaleza de cada uno de los tipos de radiación. Así, por ejemplo, resultó que los rayos β son electrones rápidos; los rayos γ , ondas electromagnéticas de alta frecuencia, y en cuanto a la radiación α , en 1909, Rutherford y Roydes demostraron definitivamente que ésta era un flujo de átomos de helio que perdieron dos electrones (helio doblemente ionizado). Por fin, en los primeros años del siglo veinte Rutherford y Soddy crearon la teoría de las transformaciones radiactivas. Dicha teoría partía del hecho de que en la naturaleza existen átomos inestables que se desintegran emitiendo distintos tipos de radiaciones: α , β y γ . La desintegración se prolonga hasta que éstos alcancen un estado estable.

Si en el momento inicial había N_0 átomos capaces de desintegrarse (radiactivos), al transcurrir el lapso t quedarán

$$N = N_0 e^{-t/\tau} \quad (17)$$

En esta fórmula e es la base de los logaritmos naturales, es decir, el número 2,718..., y τ , el tiempo de vida del núcleo radiactivo. Si observamos los núcleos durante el tiempo τ , entonces, de acuerdo con

la ley de la desintegración radiactiva (17), quedará la siguiente cantidad de éstos:

$$N = N_0 e^{-\lambda t} = \frac{N_0}{2,718}, \quad (18)$$

o sea, el 37% del número inicial. Los demás 63% se desintegrarán.

La ley de la desintegración radiactiva es una de las leyes fundamentales de la física atómica y nuclear *).

La fig. 5 representa la curva de la desintegración radiactiva de un neutrón libre. Si en cierto momento de tiempo se forma semejante neutrón, éste se desintegrará dentro de 15 minutos (tiempo de su vida) con una probabilidad igual a 0,63.

La historia de la investigación de la radiactividad en el curso del primer tercio de nuestro siglo está vinculada indisolublemente al nombre de Rutherford. El lector pudo cerciorarse de ello con sólo mirar la más breve enumeración de descubrimientos insertada con anterioridad.

El científico continuó esta lista. Tres años después de que Rutherford fuera honrado con el Premio Nobel "por las investigaciones referentes a la desintegración de los elementos y la química de las

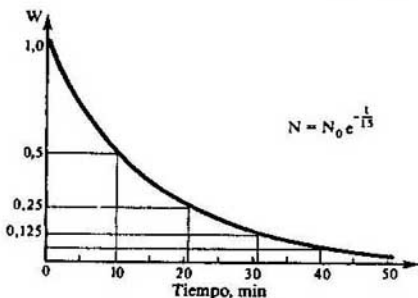


FIG. 5. Ley de la desintegración radiactiva. Desintegración de un neutrón libre. El eje de ordenadas indica la

probabilidad de descubrir el neutrón libre no desintegrado pasado el tiempo t .

* En 1931, por sus méritos científicos a Rutherford le fue conferido el título de lord. En el blasón de lord Rutherford of Nelson figuran dos curvas cruzadas de la desintegración radiactiva (exponentes) que atraviesan el campo del escudo de armas.

sustancias radiactivas" (1908), en la revista "Philosophical Magazine" fue publicado su trabajo sobre el descubrimiento del núcleo atómico y el nuevo modelo del átomo.

3.6. MODELO DEL ÁTOMO DE RUTHERFORD

Este modelo se basaba en los experimentos de dos colaboradores de Rutherford: Geiger y Marsden. A la descripción de estos experimentos están dedicados muchos libros y se citan en las páginas de los manuales. Esta es la razón por la que seremos muy breves y al final concederemos la palabra al propio Rutherford.

Geiger y Marsden estudiaban la dispersión de las partículas alfa por una hoja finísima de oro. La enorme mayoría de las partículas, al atravesar la hoja se desviaba a ángulos pequeños, pero también había excepciones. Y una partícula entre ocho mil, aproximadamente, se repelia, volviendo atrás. Rutherford, al enterarse de estos resultados, se figuró el siguiente cuadro del proceso operado. La sustancia, fundamentalmente, encierra el vacío. Alrededor del pequeño núcleo positivo (pequeño pero pesado por cuanto toda la masa del átomo está concentrada en él), como los planetas alrededor del Sol, giran los electrones. Siendo así, es poco probable que la partícula alfa que pasa a través de la sustancia choque con el núcleo. Y las colisiones con los electrones ligeros no pueden desviar notablemente su camino. Mas en el caso de que la colisión con el núcleo tuviera lugar, el ángulo de dispersión de la partícula sería grande y es posible que ésta resultase rebotada.

Rutherford distaba mucho de ser el primero entre aquellos quienes proponían el modelo planetario del átomo. Con anterioridad a él, el científico inglés G. Stoney, el francés J. Perrin, el japonés H. Nagaoka y algunos más promovían las mismas ideas. Pero Rutherford fue el primero quien a base de experimentos calculó y demostró que la mayor parte de la masa de la sustancia estaba concentrada en núcleos compactos y pesados.

Rutherford dio un paso más, y puede decirse un paso profético.

De conformidad con la electrodinámica clásica, los electrones que se mueven por una circunferencia (o elipse) deben emitir ondas electromagnéticas puesto que tienen aceleración centrípeta.

De este modo, el electrón pierde energía y, tarde o temprano, caerá sobre el núcleo.

Rutherford se daba cuenta perfecta de este hecho; sin embargo, estaba seguro de su modelo. En el artículo publicado postergó la explicación del problema sobre la estabilidad del átomo hasta el futu-

ro. Y resultó que tenía razón. Ya llegaba la era de la mecánica cuántica.

En su última intervención ante un amplio auditorio en 1936 (un año antes de su muerte) Rutherford recordaba:

"Me acuerdo de cómo vino una vez Geiger terriblemente excitado y dijo: «Logramos observar partículas alfa que vuelven atrás». Éste fue el acontecimiento más inverosímil entre los que tuve que vivir. Casi tan inverosímil como si se hubiera disparado con un proyectil de 15 pulgadas contra una hoja de papel de fumar y este proyectil hubiera vuelto atrás, batiéndonos. Después de reflexionar comprendí que esta dispersión inversa debía ser el resultado de una colisión unitaria, y cuando realicé los cálculos, vi que era imposible obtener una magnitud del mismo orden, a no ser que considere un sistema en el que la mayor parte de la masa del átomo se concentra en un núcleo pequeño. Precisamente en aquel instante en mi mente nació la idea sobre el átomo con un centro macizo pequeño portador de la carga. Calculé en forma matemática a qué ley debía subordinarse la dispersión, y hallé que el número de partículas que se dispersaban formando el ángulo dado debía ser proporcional al espesor de la hoja dispersante y al cuadrado de la carga del núcleo, e inversamente proporcional a la cuarta potencia de la velocidad. Posteriormente, esta deducción fue comprobada por Geiger y Marsden en una serie de brillantes experimentos...

Al promover la teoría de la estructura nuclear del átomo yo me daba cuenta absoluta de que, conforme a la teoría clásica, los electrones tienen que caer sobre el núcleo; ahora bien, Bohr postuló que, debido a ciertas causas desconocidas, semejante cosa no sucede y basándose en su hipótesis supo explicar el origen de los espectros. Empleando suposiciones bastante razonables, Bohr, paso a paso, resolvió el problema sobre la disposición de los electrones en todos los átomos de la tabla periódica... Como resultado de los ulteriores perfeccionamientos introducidos principalmente por el propio Bohr, así como de las modificaciones efectuadas por Heisenberg, Schrödinger y Dirac, cambió toda la teoría matemática y fueron introducidas las ideas de la mecánica cuántica".

3.7. ATOMO CUÁNTICO

De este modo, nos hemos acercado al problema probablemente más difícil de nuestro libro, el de algunos conceptos de la mecánica cuántica. Cuando relatamos sobre las partículas y su registro, no se puede pasar sin estos conceptos. Por otra parte, aquí es imposible

exponer más o menos detalladamente los principios de la teoría cuántica, ni siquiera en el nivel cualitativo.

El lector tendrá que elegir el camino de la "confianza", o bien, dirigirse a otros libros de divulgación o especiales dedicados a esta cuestión.

Muchas de las cosas válidas en la mecánica clásica dejan de serlo cuando se trata del micromundo.

Sin embargo, existen también conceptos usuales hacia los cuales es posible orientarse. En primer término, son las leyes de conservación de la energía, del impulso, del momento de impulso y de la carga eléctrica. Dichas leyes se asientan en las propiedades generales del espacio y el tiempo que no varían hasta llegar a los más pequeños campos entre los estudiados.

El comportamiento del electrón en el átomo se diferencia bruscamente de lo que podría vaticinar la física clásica. Comencemos por el más simple de los sistemas atómicos: el átomo de hidrógeno que se compone de un electrón y el núcleo cargado positivamente. Rutherford inventó para este núcleo un término especial, el "protón", que proviene de la palabra griega "protos" que significa "primero". Este término nació después de que en una serie de experimentos (año 1919) Rutherford y sus colaboradores desintegraran el núcleo atómico. Como resultado, llegaron a la conclusión de que *los protones son una parte integrante del núcleo de cualquier elemento* (en los capítulos siguientes hablaremos sobre la estructura del núcleo atómico).

El protón (se designa con el símbolo p) es 1836 veces más pesado que el electrón, su masa constituye $1,6726 \cdot 10^{-27}$ kg y la carga es igual a $+e$, de modo que entre las dos partículas actúa la fuerza de atracción eléctrica, en tanto que el átomo, en su totalidad, es eléctricamente neutro. En la actualidad se ha establecido que el valor absoluto de las cargas del electrón y del protón coincide ¡hasta la vigésima cifra decimal!

¿Qué aspecto podría tener semejante sistema integrado por un protón y un electrón desde el punto de vista de la física clásica? Podemos figurarnos un modelo mecánico simple: una bolita que gira dentro de una copa. Su energía puede tomar una serie continua de valores, y cuanto mayor es la primera, tanto mayor es la velocidad de rotación de la bolita y a tanta altura sube ésta por la pared de la copa. Y al llegar a cierta energía la bolita salta de la copa.

En el átomo, el papel de las paredes que limitan el movimiento de la bolita lo desempeñan las fuerzas eléctricas que convierten en conexo el sistema protón + electrón. Si al átomo de hidrógeno se le

comunica la energía de $13,6 \text{ eV}^*)$, el electrón será arrancado del núcleo. La energía con la cual tiene lugar este fenómeno lleva el nombre de energía de ionización.

Todo parecería ir a pedir de boca, pero, como hemos señalado, las leyes de la electrodinámica clásica presagian que el electrón acelerado dará origen a una radiación y perderá su energía. Esta circunstancia es equivalente a aquella en que la bolita de nuestro ejemplo perdía la energía en el rozamiento sobre las paredes de la copa. Al fin de cuentas la bolita cae al fondo de ésta. Justamente de la misma manera el electrón caerá sobre el protón. Sin embargo, si bien con la bolita todo ocurre precisamente así, los átomos de hidrógeno en la naturaleza siguen subsistiendo tranquilamente durante miles de millones de años.

A diferencia con la teoría clásica, la cuántica pone restricción a los valores de las magnitudes físicas. Así, por ejemplo, la energía del átomo de hidrógeno no puede tomar cualesquiera valores hasta el de la energía de ionización, sino una serie bien determinada de éstos; dichas magnitudes llevan el nombre de niveles de energía del átomo.

El estado en que el átomo de hidrógeno se encuentra en el nivel de energía más bajo se denomina estado fundamental.

En el caso de que el átomo obtenga desde fuera cierta cantidad de energía, por ejemplo, si va a parar al campo electromagnético, llega a ser posible la transición del electrón a uno de los niveles más altos. Entonces se puede hablar del estado de excitación del átomo. El retorno de éste al estado fundamental transcurre en un lapso de $\sim 10^{-8} \text{ s}$ y viene acompañado por la emisión de ondas electromagnéticas.

Y aquí llegamos al concepto de *cuanto* que dio el nombre a la nueva teoría. La radiación que el átomo emite o absorbe durante su transición entre los estados con energía E_1 y E_2 tiene una frecuencia estrictamente determinada ν y la energía $E_1 - E_2 = h\nu$ (donde h es la constante de Planck igual a $6,6 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$, o bien, $4,1 \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$). Esta porción de radiación se denomina cuanto de radiación electro-

^{*)} Es necesario acostumbrarnos a una nueva unidad de medida de la energía en el mundo de las partículas elementales que se denomina electronvoltio (eV). Un electronvoltio es igual a la energía adquirida por la partícula de carga e al pasar ésta la diferencia de potencial de 1 voltio. Y ahora insertemos varias relaciones:

$$1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-12} \text{ ergios} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J},$$

$$1 \text{ KeV} = 10^3 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-16} \text{ J},$$

$$1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ J},$$

$$1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-10} \text{ J}.$$

magnética o fotón. El impulso del fotón es

$$p = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c}.$$

El átomo de hidrógeno puede emitir un cuanto con una energía máxima de 13,6 eV, cuando el protón capta el electrón, y después de ello el átomo pasa a estar en estado fundamental. Este es el cuanto de radiación Roentgen. Durante la transición entre los niveles excitados pueden también emitirse fotones de luz visible.

Para explicar la estructura de los átomos más complejos poseedores de muchos electrones, la mecánica cuántica se vale de una característica absolutamente especial de las partículas elementales la cual lleva el nombre de "espín" (en inglés, el verbo *to spin* significa "hilar" y, también, "girar"). El espín es una característica puramente cuántica cuya esencia radica en que cualquier partícula elemental posee momento interno de impulso. Para el electrón y el protón éste es $s = 1/2\hbar$ ($\hbar = h/2\pi = 6,5 \cdot 10^{-16}$ eV·s). Para una serie de partículas el espín se expresa en partes enteras de $\hbar$ y, en particular, puede ser igual a cero. Las partículas con el espín semientero se denominan "fermiones". Este nombre les fue conferido en honor del gran físico italiano Enrique Fermi. Las demás partículas constituyen la familia de los "bosones" *). De este modo, el electrón posee un espín, y esta propiedad le es tan inherente como lo son la carga y la masa en reposo.

Con el momento mecánico de impulso está relacionado también el momento magnético. La partícula es un imán pequeño que se orienta a lo largo de las líneas de fuerza si sobre la misma actúa un campo magnético externo.

De no ser por el espín semientero, en el átomo complejo los Z electrones (su cantidad es igual al número atómico del elemento) se encontrarían en un nivel de energía, el más bajo. A los fermiones semejante conducta está prohibida por el principio de exclusión de Pauli. Dicho principio enuncia: *es imposible que dos partículas de Fermi idénticas se encuentren en un mismo estado, o sea, posean igual energía, tengan la misma dirección del espín, etc.* Por esta razón, si bien para el átomo de helio ($Z = 2$) ambos electrones pueden hallarse todavía en el nivel de energía más bajo debido a que sus espines están orientados en sentidos opuestos, ya para el tercer elemento de la tabla

*1) Por el nombre de Sh. Bose, físico indio que demostró que los cuantos de luz son partículas de "Bose". Más tarde (en 1924) sus trabajos fueron generalizados por A. Einstein.

periódica, el litio, semejante cosa es imposible. Uno de los electrones debe ocupar el nivel siguiente.

No nos detendremos en las reglas de completación de los niveles de energía de los elementos considerando que el lector las conoce por el curso escolar de química. Señalemos que la radiación de los átomos en la región visible (véase la fig. 2) viene determinada por la transición de los electrones entre los niveles excitados superiores, en tanto que para irradiar los rayos X es necesario que la vacancia para el electrón se forme en uno de los niveles inferiores, en la llamada envoltura interior del átomo.

En el siguiente capítulo podremos pasar directamente a las "huellas" que dejan en la sustancia las partículas cargadas.

Capítulo 4

HUELLAS DE LAS PARTÍCULAS CARGADAS

4.1. IONIZACIÓN Y EXCITACIÓN

Mire la fig. 6. En ésta se reproducen las huellas de las partículas vistas a través del microscopio en una placa fotográfica. Existen placas fotográficas con emulsión especial de hasta 1 mm de espesor (o sea, cien veces más que en las placas ordinarias), sensibles a las partículas cargadas. Primeramente estas placas se someten a irradiación, luego se revelan, y el investigador, valiéndose de un microscopio con aumento ordinario se convierte en testigo de las transformaciones y catástrofes que acontecen en el micromundo. Lo que vemos es una fotografía ya descifrada la cual, hasta cierto punto, es histórica. Sucedió que en 1947 el físico inglés Powell y sus colaboradores, examinando placas irradiadas, encontraron huellas análogas a las representadas en la figura. Fue así cómo fue descubierta una de las partículas elementales más interesantes, el mesón π , del cual hablaremos más tarde.

Retornemos otra vez a la figura. Se ve que las huellas de las partículas no son idénticas: unas son líneas continuas de distinto espesor, y otras están constituidas por puntos aislados. Hay en los puntos 1 y 2 unas particularidades interesantes del comportamiento de las partículas. En dichos puntos la trayectoria cambia bruscamente su dirección, hecho que, a primera vista, contradice la ley de la conservación del impulso. Se puede suponer que en estos puntos han salido ciertas partículas, las cuales no han dejado sus huellas en la placa, arrastrando al mismo tiempo una parte de la energía e impulso. Con el fin de contestar a las preguntas que surgen es necesario comprender qué es lo que sucede con la sustancia de la emulsión (y, en

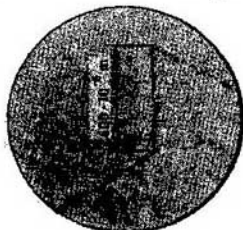


FIG. 6. Desintegración del mesón π en la emulsión fotográfica.

general, con la sustancia) cuando a través de ésta pasa una partícula.

Comencemos por el caso en que a través de la sustancia pasan la partícula α o el protón, ya conocidos por nosotros, con una energía de varios MeV. En este caso éstos avanzan con relativa lentitud, teniendo tiempo, al pasar junto a los átomos, para "dar un empujón" con su campo eléctrico a los electrones y transmitirles parte de su energía. El electrón ya pasa a un nivel de energía más alto, o bien sale volando del átomo. De este modo, la energía se invierte en la excitación e ionización. Las pérdidas de energía en cada acto de este tipo son pequeñas comparadas con la energía total de la partícula (una bola pesada choca contra una bolita ligera, el electrón). Se puede considerar que la sustancia frena suavemente a la partícula y la trayectoria de ésta resulta próxima a una recta. Aún basándose en un cuadro tan aproximado es fácil comprender que las pérdidas de energía $-\Delta E$ por unidad de camino Δx son tanto mayores cuanto menor es la velocidad de la partícula y cuanto mayor es su carga y la densidad de los electrones en la sustancia. Una relación exacta fue obtenida por Niels Bohr y tiene la siguiente forma:

$$-\frac{\Delta E}{\Delta x} = \frac{z^2 e^4}{m_e v^2} \cdot (nZ) F. \quad (19)$$

Aquí m_e y e son la masa y la carga del electrón, respectivamente; z , la carga de la partícula (en unidades de carga del electrón, por ejemplo, para el protón $z = 1$, para la partícula α $z = 2$, etc.), y v , la velocidad de la partícula.

Ahora analicemos las magnitudes que atañen el medio: n es el número de átomos por unidad de volumen de la sustancia, y Z , su número atómico. Por consiguiente, nZ es el número de electrones del medio por unidad de volumen. La función F depende de las propiedades de la sustancia y de la velocidad de la partícula pero varía en grado bastante débil.

Utilicemos la fórmula (19) para comparar las pérdidas de energía de las diferentes partículas que vuelan con una misma energía inicial, por ejemplo, de los mesones μ^+ y de los protones con una energía de 10 MeV. Como medio tomemos una película de polietileno con un espesor tan sólo de 0,1 mm. Los protones perderán en esta película 0,5 MeV. Por cuanto la masa del protón supera 8,6 veces, aproximadamente, la del mesón μ (esta última es igual a $207 m_e$), para una misma energía el cuadrado de la velocidad de la partícula ligera debe ser la misma cantidad de veces mayor que el del protón. Despreciando las diferencias de F , obtendremos a partir de la fórmula: $-(\Delta E/\Delta x)_\mu = (\Delta E/\Delta x)_p : 8,6 \approx 0,06$ MeV. Las partículas

pesadas, y además con un valor de z mayor que la unidad ($z > 1$), pierden rápidamente su energía. Cotejemos aquí los recorridos en el aire para las diferentes partículas: el protón con una energía de 4 MeV, ~ 25 cm; la partícula α ($z = 2$) con una energía de 4 MeV, $\sim 2,5$ cm; los fragmentos de la fisión del uranio ($Z = 38$) con una energía de 100 MeV, también 2,5 cm. La diferencia es colosal y, por supuesto, ésta influye en la elección del detector para uno u otro problema, así como, a veces, permite también distinguir la naturaleza de las partículas.

La partícula ionizante destruye los átomos, y en la sustancia aparecen electrones libres (o iones). Resulta que la energía que ésta consume en los gases para formar un sólo par de iones depende de un modo muy débil del tipo de gas y de la especie de la partícula. Así, por ejemplo, para el aire, nitrógeno y gases inertes dicha energía constituye 35 eV por pareja de iones. La partícula α con una energía de 3,5 MeV creará en su camino cerca de 10^5 pares de iones con una carga total de $\sim 10^{-14}$ culombios. Como veremos más adelante los físicos aprendieron a registrar con gran precisión semejantes cargas. Es muy importante que en los semiconductores, tales como el germanio y el silicio, la energía de formación de una unidad de carga sea, aproximadamente, diez veces menor que en los gases. Esta circunstancia determina las ventajas principales de los llamados contadores cristalinos, o semiconductores, puesto que una carga 10 veces mayor puede registrarse con mucha mayor exactitud.

Volvamos ahora por un rato al método fotográfico de registro. La emulsión en la placa fotográfica se compone de gelatina y pequeños cristales de plata halogenada. La partícula que pasa ioniza los átomos en estos cristales, destruye las moléculas y forma en éstas centros latentes de imagen. Durante el revelado los centros latentes forman granos negros de dimensiones muy pequeñas (cerca de medio micrómetro de diámetro). Por unidad de recorrido una partícula ligera crea menor cantidad de tales granos que una pesada con la misma energía. Debido a ello la huella del mesón π parece casi continua, en tanto que la del electrón se aproxima a una línea de trazos. Además, al final del camino, el electrón que perdió su energía se mueve siguiendo una trayectoria muy tortuosa, recordando las andaduras por un laberinto. Las partículas pesadas en su interacción con los electrones se desvían poco. En cuanto a las partículas neutras, éstas, como es natural, no dejan huellas en la placa. El método fotográfico proporciona mucha información interesante tanto acerca de la velocidad de las partículas, como de su masa y carga.

4.2. PÉRDIDAS POR RADIACIÓN

Cuando las velocidades son pequeñas la partícula en vuelo tiene tiempo para ionizar y excitar los átomos. Pero cuanto más rápido es su vuelo, tanto menos tiempo le queda para tal interacción, y los procesos de ionización comienzan a ceder la prioridad a otros mecanismos de pérdida de energía. El primero en que nos detendremos lleva el nombre de radiación de frenado.

Los físicos durante muchos años observaron en el vidrio una centelleante mancha verde que aparecía bajo la acción de un haz de rayos catódicos. Pero entre la observación y la comprensión había aún un largo trecho.

Una tarde de noviembre de 1895, Guillermo Conrado Roentgen, físico de cincuenta años de edad y profesor de la Universidad de Wurtzburgo en Alemania, bajó a su laboratorio para proseguir con las investigaciones de los rayos catódicos. Diferentes historiadores de la ciencia ofrecen distintas versiones de aquello que le ocurrió a continuación. El propio Roentgen no dejó memoria alguna referente a este acontecimiento histórico y en cuanto a otros testigos no los había por cuanto al científico le gustaba trabajar en soledad. A raíz de ello lo único que nos queda es atenerse a la variante más admitida.

Así pues, al bajar al laboratorio el profesor, no se sabe con qué finalidad, envolvió el tubo de descarga en papel negro que no dejaba pasar la luz corriente. No lejos del tubo, sobre la mesa de laboratorio, se encontraban cristales de una sal de bario con un nombre a guisa de trabalenguas: platinocianuro de bario. La habitación estaba oscura lo que permitió al científico advertir que los cristales despedían una débil luz verde. Roentgen desconectó la alta tensión en el tubo, y los cristales dejaron de centellear.

Entonces Roentgen tomó una pantalla cubierta de sal de bario, la instaló cerca del tubo y comenzó a colocar entre el tubo y la pantalla diferentes objetos. El cartón, el papel y la placa de ebonita no influían en la luminosidad del centelleo de la pantalla. En cambio, los objetos metálicos proyectaban sobre ésta una sombra negra. Evidentemente, el tubo servía de manantial de unos rayos penetrantes desconocidos. Roentgen les dio el nombre de "rayos X", y nosotros los llamamos a veces "rayos Roentgen".

¡Qué obstáculos no interponía el investigador en el camino de esta radiación! En la pantalla apareció la imagen de los huesos de la mano: es que para el nuevo tipo de rayos los tejidos blandos resultaban transparentes. Cincuenta días, o, más exactamente, cincuenta días con sus respectivas noches, casi sin interrupción, Roentgen se los pasó investigando las propiedades de los rayos X.

Ya el primer artículo del científico recorrió, literalmente, todo el mundo. Pronto fue traducido a todos los idiomas europeos y publicado en forma de folleto. El científico recibía miles de cartas. Muy pronto los rayos X comenzaron a aplicarse activamente en la medicina para diagnosticar y tratar una serie de enfermedades. Roentgen se convirtió en el primer laureado con el Premio Nobel de Física. Este le fue entregado en Estocolmo el 10 de diciembre de 1901. Sin embargo, el científico no pudo explicar la naturaleza de los enigmáticos rayos. Más aún, el gran físico hasta el fin de su vida no reconoció la existencia de electrones. Mientras tanto, precisamente su frenado en el vidrio del tubo producía los cuantos duros: los rayos Roentgen, así como cuantos más blandos, o sea, la luz verde visible.

La partícula irrumpe en la sustancia y comienza a frenarse por ésta. Ya hemos señalado que la carga que se mueve con una aceleración a emite ondas electromagnéticas, y la intensidad de esta emisión es proporcional a a^2 . La energía de los cuantos una vez más se toma a costa del frenado de la carga. De aquí, precisamente, proviene la denominación del proceso: radiación de frenado.

La aceleración del movimiento en el campo del núcleo es tanto mayor cuanto mayor es la carga del núcleo Z y menor la masa de la partícula ($a \sim 1/M$). Debido a ello la intensidad de la radiación depende de la masa como $1/M^2$, y de la carga, como Z^2 .

La más intensa es la radiación de los electrones que fueron a parar a una sustancia pesada, por ejemplo, al plomo. Las pérdidas de energía relacionadas con la radiación de frenado para partículas como el protón o para núcleos más pesados se deben tener en cuenta tan sólo para partículas muy rápidas que llegan del cosmos.

4.3. RADIACIÓN DE VAVILOV—CHERENKOV

El siguiente tipo de radiación de partículas cargadas rápidas lleva el nombre de los científicos que lo descubrieron, es la radiación de Vavilov-Cherenkov. Ésta se engendra en una situación física muy interesante cuando la partícula en la sustancia avanza a una velocidad mayor que la de la luz. Se trata, por supuesto, de la velocidad de la luz en un medio c_{medio} que puede ser varias veces menor que $c = 3 \cdot 10^8$ m/s. Pero, ¿cuál es la razón de que la luz se retarda al pasar, por ejemplo, a través de agua o vidrio?

La onda electromagnética, al incidir sobre una sustancia, obliga al electrón a oscilar con una frecuencia igual a la de las oscilaciones de su campo. Los electrones oscilantes, a su vez, emiten ondas electromagnéticas, y al campo resultante en cualquier punto se halla sumando las amplitudes de todos estos manantiales. El cuadro en su

conjunto se representa de tal modo como si la energía y el impulso transportados por la onda comenzaran a moverse en la sustancia más lentamente que en el vacío. La relación entre c y c_{medio} se denomina índice absoluto de refracción n . Para el vidrio $n = 1,5 \dots 1,7$. Esto significa que la luz en el vidrio avanza a la velocidad $c_{\text{vidr}} = (1,7 \dots 2) \cdot 10^8$ m/s y una partícula rápida puede adelantarla. Por ejemplo, el electrón con la energía de cerca de 300 keV, al irrumpir en el vidrio, durante cierto lapso, mientras no se haya frenado y perdido su energía, vuela con la velocidad $v > c$.

De acuerdo con la teoría de Maxwell, una carga que se mueve uniformemente no debe irradiar. En efecto, esto es válido para el vacío y para el movimiento en una sustancia a la velocidad $v < c_{\text{medio}}$. Ahora bien, si $v > c_{\text{medio}}$ la situación cambia.

La partícula cargada polariza el medio en su alrededor. Esta desvía los electrones del átomo hacia un lado, y los núcleos cargados positivamente, hacia el otro. Al volver al estado inicial el átomo irradia ondas electromagnéticas. Si la velocidad de la partícula es menor que c_{medio} , el campo se adelanta a ella, dando la señal a los átomos de que llegó la hora de "ponerse en marcha". Y a raíz de que la polarización de los átomos por delante coincide con la trayectoria de la partícula y por detrás es de dirección opuesta, las radiaciones de éstas, al sumarse, se extinguen mutuamente. En cambio, si $v > c_{\text{medio}}$ la simetría se altera. Los átomos por delante no tienen tiempo para polarizarse y surge una radiación que se propaga en cono, sirviendo de vértice del mismo la partícula en vuelo.

El surgimiento del cono luminoso es otra particularidad interesante de la radiación de Vavílov-Cherenkov. La partícula que se adelanta a su luz se asemeja al avión que vuela con una velocidad superior a la del sonido en el aire. En el último caso se origina una onda de choque que se propaga en cono en pos del avión. Es el llamado cono de Mach.

Hallemos el ángulo de abertura del cono luminoso valiéndonos del modelo de las olas de agua. Se sabe que éstas se propagan con pequeña velocidad, y un buen nadador puede dar alcance a la ola, mientras que una lancha la puede alcanzar y dejar atrás. Ésta es la razón por la cual no nos es difícil figurar que vamos por la orilla con una velocidad v mayor que la de la ola v_{ola} y, a pequeños intervalos de tiempo, arrojamamos piedrecitas al agua tranquila. Desde los puntos de caída, en círculos, parten las olas (fig. 7) y la envolvente de éstas representa un ángulo de magnitud 2θ . En el tiempo t recorreremos el trayecto $AB = v \cdot t$ y en el mismo tiempo la perturbación ondulatoria desde el punto A llegará hasta el punto C : $AC = v_{\text{ola}} \cdot t$. De aquí, $\cos \theta = v_{\text{ola}}/v$. Hemos analizado el caso de ondas en el plano. En el

espacio, el ángulo de abertura del cono luminoso de la radiación de Cherenkov es $\cos \theta = c_{\text{medio}}/v = c/nv$. Suponiendo $v/c = \beta$, obtendremos definitivamente

$$\cos \theta = \frac{1}{n\beta}.$$

Se ve que para $\beta < 1/n$ esta expresión pierde el sentido por cuanto el coseno de un ángulo no puede ser mayor que la unidad.

Las pérdidas de energía de una partícula cargada correspondientes a la radiación de Cherenkov son mil veces menores que las pérdidas para la ionización. No obstante, los detectores basados en el efecto de Vavilov-Cherenkov obtuvieron una amplia difusión en la física de las partículas de altas energías y de los rayos cósmicos.

Y ahora un poco de historia.

Por primera vez esta radiación la observaron María y Pierre Curie, sin sospechar su naturaleza, cuando las botellas con preparados de radio despedían una luminiscencia azul celeste. Ello tuvo lugar en los años 1900-1905. En 1926, Mallet publicó el artículo "Luminiscencia del agua y de sustancias orgánicas por acción de los rayos gamma". El científico observó la luminiscencia de las soluciones pero no pudo comprender su naturaleza. La completa investigación experimental y la descripción teórica del efecto de Vavilov-Cherenkov recae en los años 1934-1937. Serguéi Ivánovich Vavilov, insigne físico soviético (que en 1945 fue elegido presidente de la Academia de Ciencias de la URSS) encomendó a su aspirante P. A. Cherenkov investigar la luminiscencia de las soluciones acuosas de una de las sales de uranio. Las moléculas de la sal, excitadas por una fuente exterior de radiación gamma, emitían luz visible. El joven científico comenzó exitosamente los experimentos y... se vio ante un fenómeno incomprensible. Al disminuir la concentración de la sal (hasta el caso de que se sometía a irradiación el agua pura) seguía observando una luminiscencia azul. Cherenkov puso al tanto de este hecho a su dirigente, y Vavilov se interesó sobremanera por el insólito efecto. Se pensó y se realizó un gran programa de experimentos de

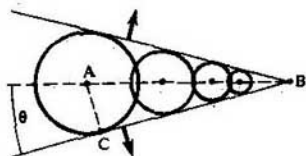


FIG. 7. Cono de radiación de Vavilov-Cherenkov.

control. Se sometía a irradiación agua en distintos recipientes, se irradiaban los más diversos líquidos orgánicos, introducían en las soluciones adiciones especiales extintoras de la luminiscencia, calentaban los líquidos (esto también extingue la luminiscencia). ¡Pero ésta no desaparecía! Más aún, su composición espectral, su intensidad, así como una serie de propiedades no variaban. Entonces Vavilov formuló dos deducciones importantísimas:

1. La radiación no está ligada con la luminiscencia.

2. Aquella se debe a los electrones rápidos que se engendran de los choques de los cuantos gamma con los átomos de la sustancia.

La segunda deducción fue confirmada por los experimentos de Cherenkov realizados con una fuente de rayos beta. Las investigaciones proseguían, y, en 1937, I. M. Frank (otro discípulo de Vavilov) e I. E. Tamm formularon la teoría del efecto de Vavilov-Cherenkov. Los resultados experimentales coincidían con buena exactitud con los cálculos de los teóricos.

El nuevo fenómeno estaba lejos de obtener un reconocimiento inmediato. I. M. Frank recuerda: "Réplicas sarcásticas con motivo de que en el instituto FIAN ^{*)} se ocupan de investigar una luminiscencia que a nadie le hace falta..." y de que "se ocupan de la luminiscencia de no se sabe qué lodo".

La revista "Nature" en 1937 no admitió para la imprenta el artículo de Cherenkov en el que se comparaban los resultados de los experimentos con la teoría. Se desarrollaban unos sucesos muy bien descritos por H. J. Lipkin (aunque con arreglo al efecto Mössbauer). El descubrimiento físico atravesaba consecutivamente una serie de períodos.

Primero: 1900-1925. Hubieran podido descubrirlo, pero no lo descubrieron.

Segundo: 1926-1933. Lo descubrieron, pero no lo compendieron.

Tercero: 1933-1937. Lo comprendieron, pero no le dieron crédito.

Cuarto: 1938-1945. Le dieron crédito, pero no manifestaron interés por él.

Quinto: 1946-1958. ¡¡¡Ah-Ah-Ah-Ah!!!

Nos queda añadir que en 1958 a los físicos soviéticos P. A. Cherenkov, I. M. Frank e I. E. Tamm les fue adjudicado el Premio Nobel de física por el "Descubrimiento e interpretación del efecto de Cherenkov". Este evento tuvo lugar pasados siete años después de la muerte de S. I. Vavilov (de conformidad con el reglamento el Premio Nobel se adjudica tan sólo en vida).

^{*)} Instituto de Física P. N. Lébedev de la Academia de Ciencias de la URSS.

Capítulo 5

EL FOTÓN Y LA SUSTANCIA

5.1. EFECTO FOTOELÉCTRICO Y EFECTO COMPTON

En el capítulo anterior, al hablar sobre el paso de la radiación electromagnética a través de la sustancia, recurrimos al cuadro ondulatorio. Sin embargo, cuando se trata de una radiación de frecuencia muy alta (por ejemplo, de los cuantos gamma), la física clásica ya es incapaz de explicar muchos (¡y, además, los principales!) de los procesos operados en esta ocasión. Aquí es obligatorio hacer uso de los conceptos cuánticos, examinando la interacción con átomos y núcleos de partículas aisladas de luz, o sea, de los fotones cuya energía es $h\nu$ y el impulso, $h\nu/c$.

El primero de los tipos de esta interacción lleva el nombre de efecto fotoeléctrico. Dicho efecto consiste en que el fotón incide sobre el átomo absorbiéndose totalmente por este último. El fenómeno viene acompañado de la expulsión de un electrón de energía E_e :

$$E_e = h\nu - E_0; \quad (20)$$

E_0 es la energía que es preciso comunicar al electrón para arrancarlo del átomo, es la energía de ionización. La teoría del efecto fotoeléctrico fue creada por Einstein. A principios de nuestro siglo él contribuyó muchísimo a la aparición de la mecánica cuántica. Sin embargo —y ésta es una paradoja triste— hasta el fin de su vida el científico no admitía las deducciones definitivas de esta teoría.

El efecto fotoeléctrico no puede transcurrir en un electrón aislado, fuera del campo del átomo, puesto que en este caso dejan de cumplirse simultáneamente las leyes de la conservación de la energía y del impulso. Una parte del impulso del fotón debe ser admitida obligatoriamente por el átomo, y cuanto más fuerte está enlazado el electrón, con tanta mayor facilidad se cumple esta condición. Esta es la razón por la cual el efecto fotoeléctrico, con mayor probabilidad, tiene lugar en los electrones de las envolturas interiores, así como en los núcleos con Z grande. La probabilidad del efecto fotoeléctrico disminuye con el aumento de la energía del fotón.

Más adelante nos interesará también el llamado efecto fotoeléctrico externo, o efecto fotoemisor, que viene acompañado con la expulsión de los electrones de la superficie del metal. En este caso

$$E_e = h\nu - E_{\text{ext}}, \quad (21)$$

donde E_{sal} es el trabajo de salida, es decir, el trabajo necesario para arrancar el electrón de la superficie. Los valores de E_{sal} para los metales no son grandes, por cuánto se arrancan los electrones libres, es decir, no enlazados con determinados átomos. Las energías se encuentran en el diapason desde 2 hasta 6 eV. De este modo, la luz amarilla puede arrancar un electrón a partir del cesio ($E_{sal} = 1,9$ eV), mientras que la superficie del platino ($E_{sal} = 6,3$ eV) debe ser iluminada para alcanzar este fin con rayos ultravioleta. El exceso de impulso durante el efecto fotoeléctrico externo admite el metal como un todo único.

El siguiente entre los procesos de interacción de la radiación electromagnética con la sustancia se denomina *efecto Compton*. Arturo Compton en los experimentos realizados durante los años 1922-1923 demostró que el cuanto de rayos X puede dispersarse en un electrón libre con la variación de la frecuencia, y la diferencia de energía $h\nu_1 - h\nu_2$ se transmite al electrón. La explicación sucesiva de este fenómeno sólo puede darse, valiéndose de las propiedades corpusculares de la radiación. Como dijera el propio Compton, se juega al billar con bolitas fotones y bolitas electrones (a propósito, el término "fotón" fue introducido por Compton). Las reglas de este "juego" son las siguientes:

$$E_e = h\nu_1 - h\nu_2, \quad (22)$$

$$\vec{p}_e = \vec{p}_1 - \vec{p}_2; \quad (23)$$

$\vec{p}_1$ y $\vec{p}_2$ son, respectivamente, los impulsos del fotón antes y después de la dispersión; $\vec{p}_e$ es el impulso del electrón, y E_e , su energía cinética. La probabilidad de tal dispersión disminuye con el aumento de la energía del cuanto.

5.2. RELACIÓN DE INDETERMINACIÓN

El efecto Compton permite ilustrar una de las leyes más asombrosas del micromundo: la relación de indeterminación.

Ya nos hemos encontrado con el hecho de que la mecánica cuántica prohíbe, a veces, la variación continua de una magnitud, por ejemplo, de la energía del electrón enlazado en el átomo. Pero la misma introduce, además, restricciones en cuanto a la posibilidad de una medición simultánea exacta de algunas magnitudes. En la física clásica no surgía duda alguna, puesto que, al saber la coordenada exacta de una partícula, se podía, en el mismo instante de tiempo, con cualquier precisión medir también su impulso. En cambio, la

mecánica cuántica afirma que esto, en principio, es imposible. No se puede realizar un experimento en que el error de medición del impulso Δp_x multiplicado por el error en el conocimiento de la coordenada Δx fuera menor que la constante de Planck:

$$\Delta p_x \Delta x \geq h. \quad (24)$$

Está claro que h es una magnitud pequeñísima, y la relación (24) no tiene importancia alguna para los cuerpos macroscópicos (grandes) que nos rodean. Figurémonos un escarabajo de 1 g de masa que se arrastra con una velocidad que hemos medido con una precisión de $\Delta v = 1$ mm/s. Entonces, la indeterminación en el valor de su impulso $\Delta p = m\Delta v = 10^{-6}$ kg·m/s. ¿Nos impedirá esto acaso averiguar la posición exacta del escarabajo? La incertidumbre de principio en el conocimiento de la posición del escarabajo constituirá no menos que 10^{-28} m, ¡pero a su vez este número es trece órdenes menor que las dimensiones del núcleo atómico! Ahora bien, en el mundo de las partículas elementales la situación cambia, y la relación de indeterminación comienza a desempeñar un papel importante. Esta relación fue formulada por uno de los fundadores de la mecánica cuántica Werner Heisenberg en 1927. A continuación insertamos un fragmento de su artículo que, en comparación con numerosas exposiciones posteriores, se presenta como mucho más sucinto y sencillo. Heisenberg somete a análisis un experimento "mental" encaminado a determinar la coordenada de una partícula.

"Si queremos poner en claro qué se debe entender cuando se dice "posición del objeto", por ejemplo, del electrón, es necesario remitirse a determinados experimentos, por medio de los cuales se tiene el propósito de hallar la "posición del electrón"; de lo contrario, este proceder no tiene sentido. Existen suficientes experimentos en los cuales, en principio, puede determinarse la "posición del electrón" y hasta con tanta precisión como se quiera. Por ejemplo, iluminamos un electrón y lo examinamos a través del microscopio. Si se vale de este método, la precisión máxima alcanzable en la determinación de la posición viene prefijada, en lo fundamental, por la longitud de onda de la luz utilizada^{*)}. Pero, en principio, es posible construir, por ejemplo, un microscopio de rayos γ , determinando con su ayuda la posición con la exactitud deseada. Sin embargo, en esta medición es esencial una circunstancia secundaria, a saber, el efecto Compton...

^{*)} Si la longitud de onda de luz es conmensurable con las dimensiones del objeto examinado, la imagen obtenida resulta imprecisa debido al fenómeno de difracción. Cuanto menor es el objeto y con cuanta mayor precisión es necesario determinar sus contornos, tanto menor debe ser el valor de λ (y, en correspondencia, mayor el valor de ν). (Nota del autor.)

En el instante en que se determina la posición, o, en otras palabras, en el instante en que el cuanto de luz es desviado por el electrón, este último varía de un modo discontinuo su impulso. Esta variación es tanto más fuerte, cuanto menor es la longitud de onda de la luz utilizada, en otras palabras, cuanto más alta es la exactitud con que se determina la posición. Esta es la razón de que en el momento en que se conoce la posición del electrón, el impulso puede ser determinado tan sólo con una precisión hasta las magnitudes correspondientes a semejante variación discontinua; de este modo resulta que con cuanta mayor precisión se determina la posición con tanta menor precisión se conoce el impulso, y viceversa".

Relaciones similares existen también para otras magnitudes cuánticas. Así, por ejemplo, la indeterminación en la diferencia de energías del sistema E_1 y E_2 medidas en los momentos de tiempo t_1 y t_2 esté vinculada con $\Delta t = t_2 - t_1$ por medio de la relación

$$\Delta(E_2 - E_1) \Delta t \geq h. \quad (25)$$

Cuanto menor es Δt , tanto más considerable puede ser la incertidumbre en la energía de transición del sistema entre el primero y el segundo estados.

Examinemos el siguiente ejemplo. Supongamos que el átomo se halla en estado de excitación cerca de 10^{-8} s, después de lo cual emite un fotón y pasa al estado fundamental. Entonces, la indeterminación en la energía del fotón que ha salido (sea que su propia energía es igual, digamos, a $h\nu = 5$ eV) será

$$\Delta(h\nu) \geq \frac{6,5 \cdot 10^{-16} \text{ eV} \cdot \text{s}}{10^{-8} \text{ s}} = 6,5 \cdot 10^{-8} \text{ eV}.$$

En este caso se dice que el ancho del nivel excitado del átomo $\Gamma \approx 6,5 \cdot 10^{-8}$ eV. Por lo visto, éste es un valor muy pequeño en comparación con la propia energía $h\nu$. Pero, con el desarrollo de la física nuclear se descubrieron partículas que recibieron el nombre de *resonancias* cuyo tiempo de vida constituye $\tau = 10^{-22} \dots 10^{-23}$ s. En este caso el ancho de la resonancia es de cerca de 100 MeV. Esta magnitud ya es comparable con la masa de las partículas (10^3 MeV). Resumiendo, se puede decir que a partir de la relación de indeterminación para el tiempo y la energía se infiere que en el estado de excitación los sistemas cuánticos no tienen una energía estrictamente determinada, sino la tienen difusa en la magnitud $\Gamma \geq \hbar/\tau$, donde τ es el tiempo de vida del sistema en este estado.

5.3. PREDICCIÓN DEL POSITRÓN

El tercer (y último) proceso de interacción de los cuantos gamma con la sustancia lleva un nombre que, a primera vista, puede parecer extraño, el de "nacimiento de pares". La detección de este proceso estaba relacionada con el descubrimiento del positrón: otra partícula elemental. Tendremos que apartarnos un poco del tema para relatar la historia de este descubrimiento y, además, de paso, dar a conocer al lector el "instrumento más original y asombroso para registrar partículas" (citamos las palabras de Rutherford). Este instrumento fue la "cámara de Wilson".

Bueno, comencemos por el vaticinio teórico. Niels Bohr, muy parco en expresiones de entusiasmo, llamó los años 1925-1930 "edad de oro de la mecánica cuántica". Dijo también: "Hubo que superar numerosos obstáculos antes de que el objetivo se haya alcanzado, y, pasó el tiempo, y tal como suele suceder, el éxito decisivo fue logrado por los más jóvenes entre nosotros".

En 1925 E. Schrödinger cumplió 38 años; Luis de Broglie, 33 años; W. Pauli, 25; E. Fermi, 24; W. Heisenberg y P. Dirac, 23 años cada uno.

El 21 de julio de 1927, el estudiante de la Universidad de Leningrado Lev Landáu, que tenía entonces diecinueve (!) años, publicó su primer trabajo el cual, más tarde, se convertiría en un párrafo obligatorio de los cursos de mecánica cuántica.

Ya para el año 1927 se elaboraron los principios fundamentales de la nueva ciencia y se creó su aparato matemático.

La mecánica cuántica estableció las leyes de la naturaleza que actúan en el seno del átomo. Sin embargo, por aquel entonces, esta ciencia era inaplicable a partículas que se mueven con velocidades próximas a la de la luz. Era preciso dar el siguiente paso y unificar la mecánica cuántica con la teoría de la relatividad. Este paso lo dio Dirac.

"Por haberme hecho escritor no se debe pensar que yo nunca aspiré a tener un oficio digno". Esta broma de Bernard Shaw la hubiera podido repetir enteramente un joven de Bristol que aspiraba al sumamente digno destino de ingeniero electricista y se convirtió en autor de muchas "ideas descabelladas" de la física del siglo XX. Su nombre completo era Paul Adrien Maurice Dirac. Después de perder su empleo en Bristol se trasladó a Cambridge donde se entusiasmó con la naciente rama de la física: la mecánica cuántica.

Más tarde Dirac decía: "Estoy agradecido al destino que nació a tiempo: de haber sido varios años mayor o menor, no se me habrían presentado tan brillantes posibilidades. Al parecer, todo me

favorecía..." Y, ante todo –añadiríamos nosotros– sus excepcionales dotes.

Y he aquí, en enero de 1928 P. Dirac dedujo la ecuación que describe el comportamiento de los electrones rápidos. De la ecuación de Dirac se derivaba la existencia en el electrón del espín, de un momento magnético; la misma explicaba algunas peculiaridades de la estructura de los niveles de energía en el átomo. Todo estaba bien, pero la ecuación admitía soluciones en que el electrón podía tener una energía cinética negativa.

Tres años, aproximadamente, los teóricos debatieron sobre estas soluciones "no físicas", hasta que el propio autor encontró la salida de la situación creada. No podemos insertar aquí sus razonamientos, y sólo comunicaremos su deducción definitiva: de acuerdo con Dirac (1931), en la naturaleza, a la par con los electrones deben existir partículas por todas sus propiedades idénticas al electrón (por la masa, por el espín), pero con carga positiva $+e$ *).

Si esta partícula entra en contacto con el electrón, las dos desaparecerán: se aniquilarán, y la masa de las partículas, de conformidad con la relación de Einstein $E = mc^2$, se transformará en energía de los cuantos gamma formados:

$$e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma$$

$$(0,511 \text{ MeV} + 0,511 \text{ MeV} \rightarrow 1,022 \text{ MeV}).$$

Se podría decir que nadie, excepto Dirac (pero ni siquiera él manifestaba especial seguridad), aceptó esta interpretación de las soluciones negativas. El punto de vista del joven científico no lo compartían ni Niels Bohr ni tampoco Wolfgang Pauli.

Pero llegó el año 1932. En los anales de la física experimental este año quedó marcado de un modo totalmente especial, como el año de muchos descubrimientos trascendentales. Lo denominaban "año de oro", "año de las maravillas" y, más tarde, recibió un calificativo más científico, el de "año de la explosión informativa" **).

Devinieron acontecimientos más importantes: el descubrimiento del neutrón y la detección en los rayos cósmicos de la primera de las antipartículas, del positrón.

*) Y con signo contrario del momento magnético.

**) Por los logros experimentales alcanzados en el año 1932 se adjudicaron cuatro Premios Nobel. Tres de éstos, en los años 1934, 1935 y 1936. Y el cuarto, más tarde, en 1951.

5.4. UN DESCUBRIMIENTO "CASUAL"

Con frecuencia se dice que el positrón fue encontrado casualmente. Escribir de esta forma se hizo casi tradicional. En efecto, Carlos Anderson quien, precisamente, fue autor de este descubrimiento, realizó experimentos "cuya finalidad consistía en medir el espectro de energía de los electrones que se forman en la atmósfera y en los materiales a consecuencia de la radiación llegada del cosmos". No se trataba de ningunos positrones (electrones positivos, como se los llamara en aquellos años).

La posibilidad de un descubrimiento casual, absolutamente casual, siempre se nos presenta como muy atractiva. Basta tan sólo dirigirse a la literatura de ciencia-ficción o recordar decenas de libros, en los cuales un hombre completamente ajeno a la ciencia, al entrar casualmente en el laboratorio, hace un descubrimiento admirable. Se dan muchísimas variantes de la trama, pero todas vienen unidas por el hecho de que no guardan relación alguna con la realidad.

Hablando con propiedad, los autores, en su mayoría, ni siquiera pretenden hacerse creer. Para ellos es meramente un medio que permite introducir al lector en el mundo de la fantasía. Pero incluso a pesar de su voluntad a los lectores les da la impresión de que también en la vida (¡claro, muy raras veces!) es posible semejante situación.

¿Es, acaso, casual que Becquerel descubrió la radiactividad; Roentgen, los rayos X, Vavilov y Cherenkov, la "radiación de Cherenkov"? Exteriormente, aparenta que, en efecto, se trata de una casualidad. Pero, por algo, precisamente a ellos les tocó esta suerte excepcional. Existen menciones bastante numerosas de que los físicos advertían la acción inusitada de los rayos catódicos. Las placas fotográficas que se encontraban cerca del tubo de descarga resultaban veladas a pesar de estar envueltas en papel opaco.

Sí, lo advertían, pero no sacaban de estos hechos conclusión alguna. Y no se trataba de personas ocasionales, sino de físicos con renombre mundial. Se necesitó la capacidad de observación y la *preparación* de Roentgen para no sólo advertir en la oscuridad la luminiscencia de los cristales de bario, sino también tener preparada una pantalla recubierta con una sal de este elemento. Precisamente a este científico le ocurrió la idea de los experimentos originales y orientados con exactitud a esclarecer las propiedades de la radiación.

El hombre de ciencia y filósofo francés Blas Pascal en una sola frase supo contestar a las cuestiones que hemos discutido con anterioridad:

"Los descubrimientos casuales se hacen por mentes preparadas".

Lo mismo afirmaba también Ernesto Rutherford: "La ciencia avanza paso a paso, y el trabajo de cualquier persona depende del de sus precursores. Si a oídos de uno llega el rumor sobre un descubrimiento súbito e inesperado, diríase, como una piedra caída del cielo, se puede estar seguro de que éste maduró como resultado de la influencia que ejercen unas personas sobre otras, y es precisamente esta influencia recíproca la que abre posibilidades extraordinarias para el progreso de la ciencia. El éxito de los científicos no depende de las ideas o de la suerte de una sola persona, sino de la sabiduría auada de muchos miles de personas que discurren sobre un mismo problema, y cada cual hace su aporte al gran edificio del saber que se erige poco a poco".

La detección del positrón puede servir de ejemplo que confirma estas palabras. El descubrimiento fue preparado por:

los primeros estudios de los rayos cósmicos;

la creación de la cámara de Wilson;

los trabajos del físico soviético D.V. Skobeltsín,

y, claro está, por la predicción de la existencia del positrón.

El año 1932 (como lo veremos más adelante) no sólo fue "año de las maravillas", sino también "año de los vaticinios realizados".

5.5. LOS RAYOS CÓSMICOS Y LA CÁMARA DE WILSON

Seguramente, todo el mundo conoce el electroscopio, este instrumento escolar. Si lo cargamos, las hojas, con el tiempo, caen y esto tiene lugar a pesar de lo bien que esté aislado el soporte y lo hermética que sea la caja. Se llega a la conclusión natural de que en el aire siempre hay portadores de carga, los iones, y su corriente descarga el electroscopio. ¿Cuál es la procedencia de estos iones? El intento de contestar a esta pregunta desempeñó un papel importante en el descubrimiento de la radiación cósmica.

A principios de nuestro siglo, después de haber sido descubierta la radiactividad, la situación, al parecer, se aclaró. Una cantidad insignificante de elementos radiactivos siempre está presente en el suelo, en los muros de los edificios, en los materiales de las instalaciones y, finalmente, en los propios experimentadores. A la atmósfera van a parar gases radiactivos (aunque, por cierto, se descomponen rápidamente). Esta radiación que viene de todas partes conduce, precisamente, a la ionización del aire. Al mismo tiempo se perfeccionaba la técnica del experimento, y los instrumentos relativamente simples se vieron sustituidos por otros más

complicados, los electrómetros, los cuales podían captar en 1 cm^3 de aire incluso la presencia de varias decenas de iones. Deseando aumentar todavía más la sensibilidad de estos instrumentos, los electrómetros se rodeaban de una capa de plomo que absorbía la radiación exterior y lo dejaban así durante varios días para que en el interior del aparato se descompusieran los gases radiactivos. Pero, a pesar de todo, la corriente de descarga seguía fluyendo. Se promovió la hipótesis de que a través del plomo penetraba la radiación energética de las rocas terrestres. Y por cuanto el principio de nuestro siglo transcurrió bajo el signo de asombrosos éxitos en la navegación aérea, surgió la pregunta: ¿por qué no despegar de la superficie de la Tierra, alejándose con ello de su radiación? Este fue, precisamente, el proceder de los científicos.

Primeramente trataron de utilizar la Torre de Eiffel (300 m), más tarde, en 1909-1910, K. Haeckel subió en un globo a la altura de cerca de 4 km. Sin embargo, las más precisas entre las primeras mediciones no fueron las de él, sino las de W. Hess (5 km). De acuerdo con los datos de este último, la corriente de ionización disminuía al principio para, luego, crecer rápidamente. A la altura de 5 km esta corriente ya resultaba tres veces mayor que en la superficie de la Tierra. Hess expresó la suposición de que existe una radiación penetrante de ionización que viene desde arriba y se debilita por la atmósfera.

En el período de 1922 a 1926, los trabajos realizados por un grupo de físicos norteamericanos encabezados por R. Millikan en globos sonda (éstos se elevaron hasta 15 km de altura), así como en zonas montañosas y bajo el agua dieron la posibilidad de establecer con exactitud que sobre la Tierra, proviniendo del espacio universal, incide una radiación desconocida. Millikan le dio el nombre de cósmica. El método de ionización ya no servía para comprender la naturaleza de esta radiación, puesto que registraba la consecuencia (la ionización) que podía haberse producido por las más diversas causas. Con el fin de avanzar en el estudio de los rayos cósmicos los físicos tuvieron que recurrir a un aparato que ya existía en aquella época, se trata de la cámara de niebla de Wilson.

Figúrense cómo asciende un flujo de aire húmedo calentado por la tierra. En las capas más altas de la atmósfera las masas de aire se expanden y, simultáneamente, se enfrían. Ahora, el vapor de agua se encuentra ya en estado sobresaturado y comienza a condensarse dando lugar a la formación de gotas. Decimos: "el cielo está cubierto por una neblina". El proceso de crecimiento de las gotas en el vapor sobresaturado resultó nada sencillo. Por ejemplo, los científicos establecieron que para la formación de la niebla son necesarios "centros de condensación": en la mayoría de los casos, pequeñas

partículas de polvo. De otro modo, en determinadas condiciones, el vapor, durante un tiempo considerable, queda sobresaturado.

También Carlos Wilson se dedicó al estudio de estos problemas. Más tarde contaba a sus amigos que ya en su juventud había admirado el hermosísimo fenómeno cuando la niebla ora aparecía, ora desaparecía, a medida que los flujos de aire ascendían a las crestas de las montañas de Escocia, o bien, descendían a los valles. Fue precisamente Wilson quien descubrió que no sólo las partículas de polvo podían convertirse en centros de condensación, sino también podían serlo los iones formados al irradiar el vapor sobresaturado con rayos X o con otros tipos de radiaciones (alfa, beta, gamma). Después de trabajar en este tema cerca de 15 años con perseverancia, orientación a un fin determinado y la habilidad de experimentador inherentes a él (Wilson era célebre por el hecho de que él mismo construía casi todos sus aparatos), el científico creó un nuevo instrumento para registrar las partículas. Le dio el nombre de "cámara de niebla", pero muy pronto los experimentadores comenzaron a llamarla "cámara de Wilson". Ahora expondremos, en los rasgos más generales, el principio de su funcionamiento. Valiéndose de un émbolo o diafragma, se hace aumentar bruscamente un volumen lleno de vapores de algún líquido (agua, alcohol, etc.). Dicho vapor, depurado minuciosamente de polvo, se encuentra cierto rato (0,1...1 s) en estado sobresaturado sin condensarse. Si en este instante a través del volumen pasa volando una partícula dejando la huella de iones, en los últimos comienzan a engendrarse gotas. La huella de la partícula llega a ser visible y puede ser fotografiada. Con este fin la pared (o las paredes) de la cámara se hacen transparentes. Luego, con bastante rapidez, a costa de la conductibilidad térmica de las paredes, la temperatura del vapor se eleva y las gotas desaparecen. Hay que volver a preparar la cámara para el trabajo, y esta preparación ya requiere decenas de segundos. Precisamente en ello radica el inconveniente principal del aparato, posee un "tiempo muerto grande", como dicen los físicos. Sin embargo, antes de que instalaciones más perfectas sustituyeran la "cámara de niebla" transcurrieron decenas de años y dio tiempo a realizar con ella descubrimientos sobresalientes. Esta es la razón de que en 1927, Carlos Wilson, por su "método de hacer visible la trayectoria de las partículas cargadas con la ayuda de la condensación de vapor", obtuvo el Premio Nobel de física *).

*) El principio aparentemente simple del trabajo de la cámara de niebla (su descripción se da incluso en los manuales de la escuela) no permite siquiera formar la menor idea acerca de las dificultades físicas y técnicas que surgían durante su construcción y puesta a punto.

De este modo, los físicos pudieron observar con sus propios ojos las partículas y determinar muchas de sus características. He aquí en las fotos las "huellas gruesas" de las partículas α , mientras que en otro lugar se ven escasas gotas que deben su formación a los electrones rápidos. La diferencia se explica fácilmente si se hace uso de la fórmula aproximada para un número N de iones que se forman en el trayecto de 1 cm (véase la fórmula (19)):

$$N \sim z^2/v^2.$$

Un electrón con la energía de 5 MeV se mueve, prácticamente, a la velocidad de la luz, mientras que la velocidad de la partícula α que posee la misma energía es 20 veces menor. Además, dicha partícula tiene una carga dos veces mayor.

Empero, la cámara todavía no permitía medir la energía de los electrones rápidos ni distinguir el signo de la carga. Por ejemplo, el protón que volaba a la velocidad $v_p \approx c$ dejaba una huella idéntica a la del electrón rápido (a pesar de que la energía del protón debía superar en 2000 veces la del electrón). El siguiente eslabón en la cadena de acontecimientos está vinculado al nombre de D. V. Skobeltsin.

El joven físico leningradense decidió utilizar la cámara de Wilson para fotografiar los electrones de retroceso (llamados también electrones Compton) que aparecían en el gas al irradiar la cámara con rayos γ (efecto Compton). Al medir la curvatura de la trayectoria de los electrones en las fotografías se podía hallar su impulso^{*)}. Por ahora, no nos detendremos en la investigación del efecto Compton la cual, de por sí, proporcionó resultados de extraordinario interés.

He aquí lo que escribió Skobeltsin: "En las fotografías, de vez en cuando, se descubrían trayectos rectos de partículas de origen desconocido que casi no se desviaban por el campo magnético, pero que por su acción ionizante no se distinguían en lo más mínimo de los rayos β rápidos, los cuales también se podían ver en las mismas fotografías.

Las observaciones ulteriores publicadas en 1925 permitieron establecer que la aparición de trayectos de semejantes "rayos ultra- β " no estaba relacionada, ni mucho menos, con el paso a través de la cámara de Wilson de los rayos γ y que se tiene a la vista un flujo de partículas que atraviesa la atmósfera". Estas eran tan rápidas que no se desviaban en el campo relativamente débil de la cámara.

Skobeltsin demostró también que la ionización creada por la radiación cósmica podía tener su explicación en las "partículas ultra-

^{*)} Recuerde las fórmulas del apartado 3.2.

β ". En una serie de fotografías obtenidas por Skobeltsin se veía todo un flujo de partículas rápidas. Éstos recibieron el nombre de chaparrones cósmicos.

Resumiendo, podemos decir que fueron reunidos los eslabones de la cadena que conducía al positrón:

1. Se descubrieron los rayos cósmicos y se esclareció que en su composición entran partículas cargadas;

2. Se creó el instrumento, la cámara de Wilson colocada en el campo magnético. El único inconveniente consistía en que este campo era todavía pequeño y no desviaba los "rayos ultra- β ".

5.6. EL POSITRÓN Y LOS "PARES"

Ya hemos hecho mención del nombre de Roberto Andrés Millikan. Era un físico relevante que en 1923 obtuvo el Premio Nobel "por los trabajos sobre el estudio de la carga elemental de la electricidad (e^-) y el efecto fotoeléctrico". Como recordaban sus amigos, en Millikan se combinaban (además de otros rasgos excepcionales) dos cualidades que difícilmente podían pasar inadvertidas. La locuacidad que excedía muchísimo de la norma media y una descomunal intuición física. Ignoramos si esta primera cualidad suya desempeñó algún papel en el descubrimiento del positrón, pero en cuanto a la segunda, la misma resultó decisiva. Enterado de los experimentos de Skobeltsin, Millikan, inmediatamente, encargó a uno de sus colaboradores, Carlos Anderson, comenzar las investigaciones de la radiación cósmica empleando la cámara de Wilson, pero colocada en un campo magnético mucho más intenso (20 veces mayor). Ello requería, por una parte, dominar el arte del experimento, y, por otra, medios técnicos inusitados para aquella época.

Y he aquí que se obtuvieron fotografías, en las cuales se veían las trayectorias curvas de partículas cósmicas. La densidad de la ionización y el radio de curvatura de la trayectoria, todo ello testimoniaba que algunas de ellas son inherentes a los electrones. Pero, ¿cómo podía explicarse la aparición de huellas con curvatura "irregular", "vueltas" en sentido opuesto? ¡El número de estas huellas en las fotografías era aproximadamente el mismo que el de las de los electrones!

La primera suposición - y, además, bastante natural - consistía en que éstos eran protones. Otro signo de la carga llevaba aparejado otro signo de la curvatura de la trayectoria. Pero la investigación de las fotografías condujo a la conclusión de que la capacidad ionizante de las partículas positivas era prácticamente igual que la de los electrones. Por consiguiente, su velocidad se aproximaba a la de la luz, el impulso

era grande y en el campo magnético éstas no debían desviarse como los electrones. La única conclusión: no son protones.

La segunda conjetura consistía en que las "partículas irregulares" eran electrones, pero que volaban en dirección contraria, desde abajo hacia arriba. Entonces Anderson emplazó en el centro de la cámara una placa de plomo, y estableció que las partículas volaban de arriba abajo, por cuanto la curvatura de sus trayectorias en la mitad inferior de la cámara es mayor: éstas perdieron parte de su energía al atravesar en su vuelo el plomo. En el caso de volar desde abajo hacia arriba el cuadro habría sido inverso: la trayectoria de las partículas habría tenido un radio de curvatura menor en la parte superior de la cámara.

Como resultado, Anderson, en 1932, supuso que las nuevas partículas no eran sino "electrones positivos" con una masa m_e y una carga $+e$. Sus pruebas encontraron pronto una confirmación convincente en los experimentos de Blackett y Occhialini. Estos científicos demostraron, además, que la aparición de los positrones en la cámara estaba relacionada con los chaparrones de la radiación cósmica.

Lo más sorprendente radicaba no tanto en el descubrimiento de una nueva partícula, aunque en la física, especialmente en aquel período, éste era un acontecimiento de importancia trascendental. Lo que sí pasmaba en este caso era el hecho de que se descubriera la partícula presagiada en 1931 y en cuya existencia nadie creía.

"La melodía se transforma en violín". Estas son las palabras del académico S. I. Vavilov. En una de sus conferencias él explicaba el proceso inverso a la reacción de aniquilación del positrón, cuando el cuanto gamma en vuelo engendra el par electrón + positrón:

$$\gamma \rightarrow e^+ + e^-.$$

Este proceso de transformación del campo electromagnético en materia fue descubierto casi simultáneamente en 1933 por cuatro grupos de físicos: en Francia, Alemania, Inglaterra y Estados Unidos.

Existen dos condiciones indispensables para el nacimiento del par. La primera reside en que la energía del cuanto gamma debe superar la suma de las energías en reposo de los componentes del par:

$$E_\gamma > 2m_e c^2 \approx 1,02 \text{ MeV}.$$

La segunda condición es la presencia de un núcleo o electrón que debe admitir sobre sí el exceso de energía y de impulso. De otro modo se infringirán las leyes de conservación.

Lo expuesto puede demostrarse de una forma estricta (lo dejamos al lector). Y nosotros nos limitaremos al siguiente razonamiento. Siempre se puede elegir un sistema de referencia tal en el que el

impulso total del par formado sea igual a cero. Para el cuanto gamma que vuela a la velocidad de la luz es imposible elegir tal sistema. Esta es la razón por la que se hace indispensable la presencia de un tercer cuerpo al cual dicho cuanto pudiera transmitir parte del impulso y energía.

Ahora podemos terminar esta larga digresión y retornar al paso de los cuantos gamma a través de la sustancia. El nacimiento de los pares electrón-positrón explicó un efecto incomprensible con el cual los investigadores se encontraron en 1930. Estos estudiaban el paso de la radiación gamma dura a través de distintos materiales descubriendo una absorción anómalamente fuerte de los cuantos. Mucho mayor que lo pronosticaba la teoría existente. (En aquellos años los físicos, valiéndose de la mecánica cuántica, podían calcular con precisión tales procesos como el efecto fotoeléctrico y el efecto Compton.) Los cálculos y el experimento comenzaron a coincidir plenamente después del descubrimiento del tercer proceso.

Es fácil imaginar que en el caso de que Anderson no hubiera descubierto "a tiempo" el positrón, lo habrían podido hacer, sin duda alguna, aquellos quienes estudiaban la absorción de los cuantos en la sustancia. Y esto concuerda plenamente con las palabras de Rutherford acerca de los descubrimientos casuales que mencionamos.

De este modo, las huellas del cuanto gamma dejadas en la sustancia siempre están ligadas con partículas secundarias: con electrones o pares electrón-positrón.

Para las diferentes energías de radiación E_γ prevalecen, por turno, los tres procesos. Por ejemplo, durante el paso a través del plomo, cuando $E_\gamma < 0,5$ MeV, interviene como prioritario el efecto fotoeléctrico; en el diapason de energías $0,5 \text{ MeV} < E_\gamma < 5 \text{ MeV}$, el efecto Compton, y para $E_\gamma > 5 \text{ MeV}$, el nacimiento de los pares. Pero, en general, la interacción de la radiación gamma con la sustancia es muchos órdenes más débil que la de las partículas cargadas. Si es necesario debilitar en 1000 veces un haz de cuantos con una energía de 10 MeV, el espesor requerido de la sustancia será en el caso de agua 3,5 m y en el caso de plomo 13 cm (para las partículas α con la misma energía, la capa de agua debería ser diez mil veces más delgada).

5.7. ANTIMATERIA

El descubrimiento del positrón por primera vez permitió echar un vistazo al antimundo. Pero ya en su admirable trabajo del año 1931 Dirac hace mención de la posible existencia de una partícula como antiprotón. Posteriormente, los físicos llegaron a la conclusión de que a cada una de las numerosas partículas elementales existentes le

corresponde su antipartícula con la misma masa y el mismo espín, pero con signos opuestos de la carga y del momento magnético. Se dan casos en que la partícula y la antipartícula coinciden. Esto tiene lugar para el cuanto gamma. Al encontrarse la partícula y la antipartícula, ambas desaparecen: se aniquilan. En este caso se engendran cuantos gamma (u otras partículas). En ocasiones, el positrón que vuela en la sustancia no se aniquila inmediatamente con el electrón, sino forma con éste un sistema unido, una especie de átomo de hidrógeno en el cual el positrón hace las veces de protón. Semejante sistema lleva el nombre de "positronio" y vive un espacio de tiempo muy corto: cerca de 10^{-10} s.

Los siguientes pasos al antimundo —el descubrimiento del antiprotón y del antineutrón— fueron hechos tan sólo al cabo de un cuarto de siglo. Para conseguir este fin se necesitó crear aceleradores de partículas de altas energías. En estas máquinas (sobre las cuales hablaremos más adelante) fueron obtenidos también los primeros antinúcleos.

En 1970, los científicos soviéticos sintetizaron el núcleo compuesto de dos antiprotones y un antineutrón, o sea, *el antihelio-3*.

Aunque el relato sobre la antimateria puede continuarse todavía durante mucho tiempo, tenemos que proceder a hablar acerca de otros tipos de interacción. En cuanto a la antipartícula, el lector volverá a oír sobre ésta en las páginas del presente libro, en el capítulo "Radioquímica, el Sol y el neutrino".

Capítulo 6 EN EL SENO DEL NÚCLEO

6.1. LOS NEUTRONES Y LAS FUERZAS NUCLEARES

Una vez descubierto el núcleo atómico era necesario dar el siguiente paso: comprender, en fin de cuentas, qué hay en el interior de éste. Los experimentos de Rutherford demostraron que la carga positiva en el núcleo la portan las partículas pesadas, los protones. Sin embargo, cuando se hacían intentos de explicar la correlación entre la carga y la masa de núcleos más complejos que el de hidrógeno, inmediatamente surgían dificultades. Si los núcleos constan de protones, ¿por qué, entonces, la carga del núcleo de helio es dos veces mayor que la del protón, mientras que su masa lo es cuatro veces? Esta falta de correspondencia aparece también para otros núcleos. Entonces se supuso que a la par de protones el núcleo contiene electrones. En el núcleo de helio hay cuatro protones y dos electrones, los cuales, precisamente, compensan la carga de dos protones. Los núcleos pesados contienen mayor número de electrones. Al parecer, esta hipótesis explica la estructura de la materia, pero la mecánica cuántica, que acababa de aparecer, se opuso al deseo de los físicos de "meter por fuerza" los electrones en el núcleo. En efecto, si el electrón se encuentra dentro de este último, entonces, la indeterminación de su coordenada Δr no puede superar considerablemente las dimensiones del núcleo, digamos, 10^{-14} m. En este caso, los valores mínimos de indeterminación del impulso $\Delta p = \hbar/\Delta r \approx 10^{-20}$ kg·m/s (de conformidad con la relación de indeterminación de Heisenberg) y de la energía del electrón $\Delta K \approx \Delta p \cdot c \geq 20$ MeV.

Para retener el electrón en el núcleo la profundidad del pozo de potencial debe superar ΔK , es decir, $\Delta \Pi < -20$ MeV. Pero las fuerzas eléctricas a la distancia $\Delta r = 10^{-14}$ m dan el valor absoluto de Π muchas veces menor. De este modo, si los electrones se encuentran en el interior del núcleo no es del todo comprensible qué es lo que les retiene allí. Sea como fuere, la hipótesis protónico-electrónica se mantuvo durante un período bastante prolongado, hasta que en el memorable año 1932, el discípulo y colaborador de Rutherford, Chadwick, descubrió el neutrón, una partícula neutra con una masa próxima a la del protón. Casi a un mismo tiempo físicos de distintos países: D. D. Ivanenko de la Unión Soviética, E. Majorana de Italia y W. Heisenberg de Alemania, llegaron a la conclusión de que los ladrillitos, a partir de los cuales se

forman los núcleos atómicos, son los protones y los neutrones. Ellos están ligados por las fuerzas que la ciencia todavía ignora. Desde este instante, precisamente, toma su principio la ciencia llamada física nuclear.

Ahora conozcamos más detalladamente el neutrón. He aquí su "carta de identidad".

La carga eléctrica es igual a cero. La masa es de $939,54 \text{ MeV}^*)$ (o bien, $1,6749 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$) lo que en $1,3 \text{ MeV}$ supera la masa del protón (la diferencia constituye cerca del $0,1\%$). El espín es de $1/2 \hbar$. El neutrón es una partícula de Fermi. El hecho de que el neutrón libre es más pesado que el protón lo convierte en inestable (véase la fig. 4), ahora bien, en los núcleos éste puede permanecer sin desintegrarse. Todo radica en que en el interior del núcleo los protones y neutrones están enlazados por un nuevo tipo de fuerzas, las fuerzas nucleares, por medio de una interacción fuerte. Los experimentos han demostrado que estas fuerzas actúan sin hacer diferencia entre los protones y neutrones. Para las fuerzas nucleares estas partículas son iguales, y, cuando se quiere recalcar esta circunstancia, las dos especies de partículas se denominan simplemente *nucleones*. Las fuerzas en cuestión se distinguen de una forma sorprendente de las electromagnéticas. En primer término, actúan a distancias muy cortas: los nucleones no perciben la presencia recíproca mientras no se acerquen a la distancia de $10^{-14} \dots 10^{-15} \text{ m}$. Luego, un "chasquido", y se conecta el campo nuclear.

La magnitud de las fuerzas nucleares es enorme: éstas comprimen la sustancia nuclear hasta una densidad de centenares de millones de toneladas en 1 cm^3 . (En la naturaleza se conocen objetos macroscópicos en los cuales la sustancia está comprimida hasta densidades nucleares; estos objetos son las estrellas de neutrones.) Debido a la interacción fuerte los nucleones en el núcleo son más ligeros que en estado libre. Recordemos que la masa de las partículas en interacción es menor que la suma aritmética de sus masas. La diferencia recae en la energía de enlace de las partículas entre sí. Para los elementos de la parte central del sistema periódico de Mendeléiev la energía necesaria para arrancar un nucleón a partir del núcleo constituye cerca de 8 MeV . Por esta razón, a diferencia de los neutrones libres, los enlazados en el núcleo están lejos de desintegrarse siempre en un protón y un electrón, por cuanto esto puede ser poco ventajoso desde el punto de vista energético. Todavía

^{*)} Con frecuencia, se entiende como masa de las partículas elementales la energía en reposo $m_0 c^2$, o, en otras palabras, la masa se mide en unidades de energía.

volveremos al problema de las transformaciones de los nucleones en el interior del núcleo y al de la desintegración beta, mientras tanto, ahora, continuaremos nuestro relato, en pocas palabras, sobre las propiedades de los núcleos.

Debido al corto alcance de las fuerzas nucleares las partículas perciben tan sólo a sus vecinos más próximos. En este sentido el núcleo se asemeja en algo a una gota de agua, en la cual las moléculas también entran en acción recíproca solamente con las moléculas vecinas, y las partículas que se encuentran en la superficie de la gota se "afanan" por introducirse en su interior creando las fuerzas de tensión superficial.

Pero el núcleo no es meramente una gota, es una gota cargada, en la cual rivalizan, pugnando entre sí, las fuerzas de atracción y las fuerzas culombianas de repulsión que actúan entre los protones. A medida que crece Z (Z es el número de protones en el núcleo, o sea, el número atómico) las fuerzas de repulsión se intensifican, mientras que las fuerzas nucleares siguen siendo constantes. Esta es la causa de que los núcleos con un Z muy grande ($Z > 100$) pasan a ser inestables: las fuerzas eléctricas los desgarran.

En los núcleos ligeros estables la cantidad de protones y de neutrones es aproximadamente la misma, $Z = N$, y en los pesados $N = 1,6Z$. Sería útil rememorar varios términos referentes a la relación entre los neutrones y protones. Así, por ejemplo, los núcleos con una cantidad total idéntica de nucleones $A = Z + N$ (A es el número de masa) se denominan *isóbaros*; los de cargas iguales Z (los núcleos de un mismo elemento químico), pero con un número distinto de neutrones, llevan el nombre de *isótopos*, y los de distinto Z , pero igual N , se llaman *isótonos*. Para los elementos se han adoptado las siguientes designaciones: ^A_Z (símbolo del elemento). Por ejemplo, ^4_2He , ^9_4Be , $^{37}_{17}\text{Cl}$, $^{37}_{18}\text{Ar}$, etc.

La cantidad de núcleos estables es menor que la de inestables. Actualmente se conocen cerca de 350 de los primeros, mientras que los inestables cuentan con más de un millar. La enorme mayoría de éstos se obtiene en aceleradores y reactores; son isótopos radiactivos artificiales, a diferencia de los naturales: el uranio, radio, torio, etc.

Ya antes del descubrimiento del neutrón Rutherford vaticinó que si se detectaba una partícula neutra, ésta sería un magnífico instrumento para el estudio del núcleo atómico. Con anterioridad a 1932 los físicos, en la mayoría de los casos, utilizaban para el bombardeo de los núcleos un solo tipo de proyectil: la partícula alfa. Ahora podían bombardear la materia con neutrones. Aunque la intensidad de los primeros manantiales de neutrones era pequeña, las propiedades de la nueva partícula compensaban este inconveniente.

La ausencia de la carga permite al neutrón acercarse al núcleo y penetrar en él con mucha mayor facilidad que lo puede hacer la partícula alfa cargada positivamente o el protón. La interacción de los neutrones con los electrones del medio es muy débil, y la longitud de su recorrido en la sustancia es incomparablemente mayor que la de las partículas cargadas con la misma energía.

Los experimentadores comenzaron ahora a "disparar" contra los núcleos valiéndose de neutrones y fueron los físicos italianos los que alcanzaron mayores éxitos en este camino.

6.2. EL DESCUBRIMIENTO DE FERMI

Hace varios años, en uno de los institutos de Moscú se celebró una olimpiada para alumnos de los grados superiores de la escuela secundaria. Entre los problemas propuestos figuraba el siguiente.

"Una fuente de neutrones irradia una placa de plata, después de lo cual su actividad se determina con un contador. Si entre la fuente y la placa se coloca un pedazo de parafina, la actividad de la plata aumenta considerablemente. Explique este fenómeno".

Ignoro si alguien de los participantes contestó correctamente a esta pregunta, pero la misma es un testimonio de la muy alta opinión que los organizadores de la olimpiada tienen de nuestros alumnos. Puesto que el hombre que explicó este crecimiento de la actividad obtuvo en 1938 por esta investigación (y por otras más) el Premio Nobel. Se trata del físico italiano Enrique Fermi a quien mencionamos ya en las páginas de este libro.

Las cosas se desarrollaron de la siguiente manera.

Un grupo de físicos en el laboratorio de la Universidad de Roma estudiaba la radiactividad artificial que aparecía al irradiar diferentes elementos con neutrones. Los neutrones se captaban por los núcleos de la muestra, estos últimos se transformaban en radiactivos y se desintegraban emitiendo partículas β . Radiactividad de este tipo fue encontrada en 37 sustancias de las 63 investigadas. Las investigaciones estaban encabezadas por Fermi que por aquel entonces tenía 33 años de edad; Bruno Pontecorvo, el más joven miembro del grupo, tenía 21 años. Precisamente este último y Eduardo Amaldi descubrieron el extraño efecto: la actividad de la muestra irradiada (en este experimento ésta era de plata) dependía no sólo de la fuente, sino también de los objetos que la rodeaban. La fuente de neutrones se situaba dentro de un pequeño cilindro de plata. Y resultaba que, en dependencia de dónde se encontraba el cilindro — en una mesa de madera, un banco de mármol o una placa metálica — el contador, al cual éste luego era acercado (la fuente de neutrones, por supuesto, se

sacaba), indicaba un número ora mayor, ora menor de partículas emitidas. El 22 de octubre de 1934, por la mañana, como recuerda Fermi, él recomendó colocar entre el cilindro y la fuente sacada de este último un pedazo de parafina. Más tarde ni el propio científico podía explicar qué era lo que le dirigía. "Ocurrió precisamente de este modo: ningún presentimiento, ningunos razonamientos conscientes preliminares".

Se compararon las indicaciones del contador en presencia de la parafina y sin ésta, en igualdad de las demás condiciones. La parafina aumentaba la actividad de la plata casi cien veces.

"Al principio pensé que se había estropeado el contador ya que antes nunca obtuvimos actividades tan enormes, pero, de inmediato, fue demostrado que este crecimiento estaba condicionado precisamente por la parafina. A título de filtros interpuestos en el camino de los neutrones ensayamos otras sustancias, pero éstas no surtían un efecto tan grande como la parafina. Para nuestro receso corriente de comida y descanso nuestras observaciones seguían siendo para nosotros un enigma absoluto". Después de la comida el enigma dejó de existir debido a que en este lapso Fermi encontró la explicación de los fenómenos operados.

En los experimentos del grupo de Roma la fuente emitía, en lo fundamental, neutrones rápidos. Pero éstos son captados por los núcleos con una probabilidad mucho menor que los lentos. Era necesario retardarlos, y la parafina cumplió esta tarea. Cuando un neutrón rápido irrumpe en la sustancia, con mayor frecuencia que la captura se desarrolla el proceso en el cual el núcleo y el neutrón se comportan como bolitas elásticas con masas $m_{\text{núcl}} = A$ y $m_n = 1$ ^{*)}. La partícula choca contra el núcleo dispersándose de una forma elástica. En este caso su energía cinética K_n disminuye, como promedio, en la magnitud $(\Delta K_n / K_n)_{\text{med}} = 2A / (1 + A)^2$. Para los núcleos pesados esta disminución es insignificante, constituyendo para $A = 100$ un 2% de la energía inicial del neutrón. Un cuadro completamente distinto surge cuando el neutrón atraviesa un medio que contiene hidrógeno, por ejemplo, la parafina. A cada colisión con el protón, la pérdida media de energía constituye la mitad de la inicial, y una partícula con $K_n = 1$ MeV necesitará cerca de 25 impactos con los núcleos de hidrógeno para que su energía se haga próxima a la del movimiento térmico, que constituye 0,025 eV.

La intercalación de la parafina entre la fuente y la muestra permitió transformar el espectro de energía de los neutrones. El

^{*)} Las masas se dan en unidades de masa atómicas (u.m.a.):
1 u.m.a. = $1,6606 \cdot 10^{-27}$ kg.

número de neutrones lentos aumentó muchas veces y, en correspondencia, aumentó también la probabilidad de ser capturados por la plata.

6.3. LOS CAMPOS

Nos hemos referido a la captura de los neutrones, a su interacción con los núcleos y a las fuerzas intranucleares. ¿Cómo puede concebirse el campo de estas fuerzas? Para contestar a esta pregunta tendremos que retornar al electromagnetismo.

Después de la creación de la mecánica cuántica los físicos, a finales de la década de los 20, comenzaron a elaborar la electrodinámica cuántica.

Durante muchos años esta ciencia era la más consecuente y exitosa de todas las teorías de las partículas elementales. Los métodos desarrollados en la misma servían de modelo para la descripción de otros tipos de interacción.

Desde el punto de vista de esta teoría el campo de la carga es un conjunto de cuantos electromagnéticos, fotones, que, ininterrumpidamente, se irradian y absorben por la partícula. Parece como si ésta estuviera rodeada de una aureola formada por éstos. La naturaleza de dichos cuantos no es del todo común. Para no infringir la ley de la conservación de la energía (¿de dónde, digamos, el electrón en reposo puede sacar la energía para emitir un cuanto?), el tiempo Δt entre la emisión y la absorción del fotón se limita por la relación de indeterminación $\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar$. Es precisamente la indeterminación en el valor de la energía del electrón la que permite existir al fotón.

Si Δt es pequeño, ΔE es bastante grande. A costa de la energía "difusa" el cuanto, a su vez, puede engendrar el par electrón-positrón (la carga debe conservarse!). Ahora resulta que el campo electromagnético se concibe como un conjunto de fotones, electrones y positrones que aparecen y desaparecen.

Las partículas, cuya existencia es asegurada por la relación de indeterminación, llevan el nombre de virtuales (posibles). No se pueden registrar directamente. Pero basta comunicar a la carga una energía suficiente y los cuantos se convertirán en reales, de la misma manera como los pares que nacen.

R. Feynman creó un método patente de descripción de la interacción de las partículas en la teoría del campo, el método de diagramas. Uno de éstos puede verse en la fig. 8. Tiene lugar la dispersión de un electrón en el otro. Su mecanismo es el siguiente: el primer electrón irradia un fotón virtual, el segundo lo absorbe, y, de este modo, las partículas entran en acción recíproca. Por supuesto, los

electrones pueden intercambiar tanto dos, como tres y un número mayor de fotones. Pero estos procesos son cada vez menos probables.

Durante el tiempo Δt el fotón recorre la distancia $\Delta l = c\Delta t$; en este caso $\Delta E \leq \hbar c/\Delta l$. La masa en reposo del fotón es igual a cero, y ΔE puede ser cuan pequeño se quiera, mientras que Δl , grande. Esto corresponde al hecho de que los electrones, aunque de manera débil, entran en acción recíproca a distancias lejanas.

Ahora pasemos a las interacciones fuertes. En 1935, el físico japonés Yukawa llegó a la conclusión de que el limitado radio de acción de las fuerzas nucleares (10^{-15} m) evidencia que los cuantos del campo nuclear, aquellos mismos que realizan la interacción entre los nucleones, deben tener, obligatoriamente, masa en reposo. Y, además, lejos de ser pequeña. De las evaluaciones de Yukawa, ésta resultaba aproximadamente igual a 150 MeV. Tratemos de ilustrar esta tesis cualitativamente, apoyándonos en la relación de indeterminación de la energía y el tiempo. Si la masa del cuanto es $m_0 c^2 = 150$ MeV, entonces, cuando el nucleón emite semejante partícula virtual, la indeterminación en la energía ΔE debe ser mayor que 150 MeV. Ello conduce a la limitación en tiempo de la existencia del cuanto:

$$\Delta t < \frac{\hbar}{\Delta E} = \frac{6,5 \cdot 10^{-16} \text{ eV} \cdot \text{s}}{150 \cdot 10^6 \text{ eV}} \approx 4 \cdot 10^{-24} \text{ s}.$$

Este es el tiempo concedido al transportador de la interacción nuclear. Incluso en el caso de que él se mueva a la velocidad de la luz, la distancia, a que el cuanto puede alejarse del nucleón, no supera $R < c \cdot \Delta t \approx 10^{-15}$ m. De este modo se obtiene un orden correcto de las dimensiones de la esfera de acción de las fuerzas nucleares.

Transcurridos doce años después del trabajo de Yukawa, esta partícula fue descubierta. Es el mesón π . Su masa es de 139 MeV.

De este modo, durante largo tiempo el nucleón se concebía como cierta nube titilante formada de mesones π y pares nucleón-antinucleón que aparecían y desaparecían. La interacción fuerte se realiza intercambiando mesones π virtuales a pequeñas distancias.

Con el correr del tiempo los haces de partículas en los acele-

FIG. 8. Dispersión del electrón en el electrón. Diagrama de Feynman. Un electrón emite el cuanto gamma y el otro lo absorbe.



radores se aceleraban hasta energías cada vez mayores, y los experimentadores pudieron penetrar con la vista a profundidades cada vez mayores en la materia. Resultó que el mecanismo de la interacción fuerte es muy complicado. El intercambio de mesones π es tan sólo la primera aproximación, aunque, por cierto, correcta, en la descripción de las fuerzas nucleares. Los mesones π no son cuantos elementales del campo a semejanza de los fotones en el electromagnetismo. Al igual que los nucleones, ellos están constituidos por unas partículas completamente especiales: los quarks, y estos últimos, al entrar en acción recíproca, intercambian los cuantos del campo que llevan el nombre de *gluones* (de la palabra inglesa "glue" que significa "cola").

En este párrafo hemos discutido muchas cuestiones difíciles. Pero lo principal que se debe extraer de esto es que cualquier interacción no es sino un intercambio de partículas virtuales, mientras que el carácter limitado del alcance de un tipo determinado de fuerzas testimonia que las partículas que transfieren la interacción poseen masa.

6.4. CONSERVACIÓN DE LA CARGA BARIÓNICA

Con el tiempo aumenta cada vez más el número de partículas elementales conocidas. Y para mayor comodidad de su clasificación éstas se aúnan, según diferentes indicios, en grupos, y a estos grupos les inventan nombres. Así, por ejemplo, a todas las partículas que toman parte en la interacción fuerte se les denomina *hadrones*. Los hadrones se subdividen en dos clases grandes. Los más ligeros, con un espín cuyo valor se expresa en números enteros de $\hbar$, se denominan *mesones*. En las páginas de este libro ya nos hemos encontrado con representantes de esta clase, los mesones π . Los hadrones pesados, cuyo espín es semiintegral, forman la clase de *bariones*. A ésta pertenecen los nucleones: el neutrón y el protón; los antinucleones: el antineutrón ($\bar{n}$) y el antiprotón ($\bar{p}$), así como otras partículas, por ejemplo, el hiperón lambda (λ^0), etc. Al investigar los procesos que se operan con las partículas elementales, los físicos llegaron a la conclusión de que en cualesquiera colisiones, desintegraciones y reacciones de nacimiento siempre se conserva la siguiente magnitud: el número de bariones menos el número de antibariones. Por ejemplo, λ^0 , al desintegrarse, se transforma en protón y mesón π ; durante la desintegración de un neutrón libre aparece, obligatoriamente, un protón, y el mesón π^0 acelerado hasta grandes energías puede engendrar tan sólo el par nucleón y antinucleón y no, digamos, dos neutrones. Si atribuimos a los bariones la carga $+1$; a los antibariones -1 , y a todas las demás partículas, 0 , la carga total, para todas las transformaciones

conocidas, permanecerá constante: en la naturaleza se cumple la ley de conservación de la carga bariónica. Desde luego que el término "carga" empleado con arreglo a los bariones no es del todo acertado: "Conviene subrayar que, a diferencia de la carga eléctrica, la bariónica no crea campo eléctrico a su alrededor y no sirve de fuente para cualquier acción de gran alcance. Aquella simplemente se conserva..." (L. B. Okun). ¿Con qué precisión se cumple esta ley y existen o no procesos muy raros en que ésta se infrinja?

Estas preguntas hicieron que los experimentadores volvieran sus ojos hacia el protón. Es el más ligero entre los bariones, y en el caso de que la ley de la conservación de la carga bariónica sea aproximada, el protón podrá desintegrarse en mesones, por ejemplo, en mesones π^0 y π^+ . La existencia de nuestro mundo indica directamente que el protón es bastante estable. De lo contrario, en lo que lleva de vida el Universo (10^{10} años) todos los núcleos se habrían desintegrado, desapareciendo, de por sí, todas las cuestiones. Pero, a pesar de todo, siendo que el protón tenga una vida muy larga (τ_p), este proceso se podía registrar y se realizaron los experimentos. Estos dieron el valor de $\tau_p > 10^{30}$ años.

El interés hacia el problema de la estabilidad del protón cobró nueva fuerza en relación con los intentos de la "gran unificación" de las interacciones electromagnéticas, débiles y fuertes.

En las nuevas teorías se resolvieron los procesos que podrían llevar a la desintegración del protón con $\tau_p = 10^{31} \dots 10^{33}$ años. Actualmente, varios grupos de experimentadores anunciaron su propósito de intentar descubrir la desintegración del protón. Aparecieron también las primeras indicaciones sobre la posible existencia de la misma.

Capítulo 7

INTERACCIONES DÉBILES

7.1. ¿POR QUÉ SON DÉBILES?

Los procesos más rápidos entre los conocidos en el mundo se desarrollan por impacto de la interacción fuerte, por ejemplo, los de desintegración de las partículas resonancias. Dichos procesos transcurren en el tiempo τ mientras la partícula que se mueve a una velocidad próxima a la de la luz se haya desplazado a distancias atómicas (10^{-15} m). De este modo, $\tau \approx 10^{-22} \dots 10^{-23}$ s. Mucho más lenta es la acción de las fuerzas electromagnéticas. La desintegración del mesón π^0 en dos cuantos gamma transcurre en 10^{-15} s, aproximadamente, y en los núcleos en los cuales la energía de radiación es menor y existen muchas causas diferentes capaces de retardar los procesos electromagnéticos, $\tau_\gamma = 10^{-15} \dots 10^{-6}$ s.

Los físicos tropezaron por primera vez con las interacciones débiles al estudiar la desintegración beta. Ésta transcurre en lapsos realmente "humanos", en segundos, minutos y años. Y, en consecuencia, las fuerzas que la provocan son mucho más débiles que las electromagnéticas: de aquí, precisamente, viene el nombre de esta interacción.

La desintegración beta se hace posible cuando al sustituir en el núcleo el neutrón por el protón (o, viceversa, el protón por el neutrón) el nuevo núcleo obtenido tiene una masa en reposo menor, es decir, mayor energía de enlace. El exceso de energía se distribuye entre los productos de la reacción. La desintegración beta puede ser de tres tipos.

1) Uno de los neutrones en el núcleo se transforma en protón y se emite un electrón (desintegración β^-):



Es evidente que durante esta desintegración la energía en reposo del núcleo precursor E_{pr} debe superar la energía en reposo del núcleo hijo (descendiente) E_h más que en $m_e c^2 = 0,511$ MeV.

Ya hemos hablado sobre la más simple de las desintegraciones β^- , sobre la del neutrón libre, al enumerar las propiedades del neutrón en el capítulo anterior. (En este caso, la energía que se desprende $E_{pr} - E_h = 1,3$ MeV se invierte en la formación del electrón y la energía cinética de los productos de la reacción.)

2) El protón que forma parte de la composición del núcleo se

descompone en un neutrón y un positrón (desintegración β^+):



3) Finalmente, el núcleo, a veces, capta el más próximo de los electrones atómicos (captura electrónica) transformándose en otro núcleo con una carga menor en una unidad:



en este caso la partícula β no se irradia.

7.2. ENIGMAS DE LA DESINTEGRACIÓN β

La investigación de la desintegración β planteó, inmediatamente, ante los físicos una serie de problemas difíciles. En primer lugar, constituía un enigma el espectro continuo de energías de los electrones emitidos (fig. 9). En efecto, al núcleo hijo (descendiente), durante la desintegración, corresponde una parte insignificante de energía. Prácticamente, toda la diferencia $E_{pr} - E_h - mc^2$ se consume para la creación de la energía cinética del electrón, y esta magnitud es constante. Ahora bien, en el experimento se observaba el cuadro representado en la fig. 9. Se irradiaban electrones de cualesquiera energías hasta cierta energía límite $E_{lim} \approx E_{pr} - E_h - mc^2$. Durante la desintegración α no tenía lugar nada parecido: salían volando partículas α de una o varias energías determinadas. Por esta causa se supuso que la culpa la tiene el manantial: las partículas β pierden su energía cuando atraviesan el material. A raíz de ello el espectro de rayas inicial se enturbia. Con el fin de comprobar esta hipótesis varios grupos de experimentadores realizaron los llamados experimentos calorimétricos. Estos se llevaban a cabo de la siguiente manera: el preparado radiactivo se colocaba en un calorímetro de paredes gruesas, de manera que las partículas β se absorbiesen por completo en ellas. Dicho proceder dio la posibilidad de medir la energía desprendida en un tiempo determinado. Una vez conocida la actividad del manantial y, con ello, el número total de electrones emitidos, se

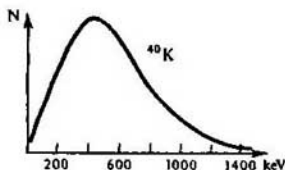


FIG. 9. Distribución por energías (el espectro) de los electrones expulsados durante la desintegración del potasio-40 (N es el número de partículas β).

calculó la energía correspondiente a una partícula β . Los experimentadores esperaban que ésta resultase próxima a E_{lim} pero una tras otra vez obtenían un valor dos veces menor, aproximadamente, en correspondencia con el espectro representado en la fig. 9.

También existía otro enigma de la desintegración β . Consistía en que en este proceso no se cumplía la ley de conservación del momento de impulso. El cálculo de los espines de los núcleos precursor e hijo, así como del electrón escapado ponía de relieve el "déficit del momento". Este déficit constituía como mínimo $-1/2\hbar$.

Aproximadamente por ese entonces Niels Bohr pronunció su frase célebre: "Cabe esperar de la desintegración β nuevas sorpresas".

Y en este preciso momento Wolfgang Pauli encontró una brillante salida a la situación creada que proporcionó trabajo a los experimentadores para muchos años en adelante.

7.3. HACE SU APARICIÓN EN ESCENA EL NEUTRINO

El 22 de octubre de 1933, en Bruselas, se inauguró el VII Congreso de Solvay. Estos encuentros internacionales de científicos dedicados al estudio de la estructura de la materia tenían su comienzo en el año 1911. En aquella época, el ingeniero inventor belga Ernesto Solvay que había inventado un método barato de obtención de la sosa, el cual le había proporcionado grandes riquezas, por primera vez asignó los recursos necesarios para la celebración de semejante encuentro.

La relación de los participantes en el VII Congreso, al igual que de los anteriores, es una verdadera lista "estelar". Aquí figuraban tanto los físicos de la vieja generación: María Curie, Ernesto Rutherford, Niels Bohr, como científicos más jóvenes pero ya célebres por sus descubrimientos: J. Chadwick, P. Dirac, E. Fermi, W. Pauli. También estaban presentes los esposos Irene y Federico Joliot-Curie. Estos últimos esperaban su turno para informar sobre sus nuevos trabajos en el campo de la física nuclear. En aquel entonces, muchos, se puede decir, casi todos, excepto Bohr y Pauli, ponían la labor de éstos en tela de juicio. Pero al cabo de muy poco tiempo (tan sólo unos tres meses) el matrimonio Joliot-Curie sorprendió al mundo con el descubrimiento de la radiactividad artificial.

El Congreso hizo el balance de muchas conquistas de la física nuclear. Entre éstas figuraban el modelo neutrón-protónico del núcleo, el descubrimiento del positrón en los rayos cósmicos y los trabajos con el isótopo pesado de hidrógeno, el deuterio, cuyo núcleo consta de un neutrón y un protón. Funcionaba con seguridad el

ciclotrón, nuevo acelerador de partículas elementales pesadas.

Precisamente en los trabajos de este Congreso fue registrada la hipótesis de Pauli sobre la existencia de una nueva partícula con propiedades asombrosas. Por primera vez la enunció tres años antes, en diciembre de 1930, en una carta dirigida a la conferencia de físicos celebrada en la Universidad de Tubinga. Esta carta, que ocupó su lugar en la historia, comenzaba y terminaba en forma de broma: "Queridos señoras y señores radiactivos. Les ruego escuchen con atención en el momento más cómodo para ustedes al mensajero que les entregó esta carta. Éste les informará que yo he encontrado un excelente medio para salvar la ley de la conservación de la energía y obtener una estadística acertada... Este medio consiste en la posible existencia de partículas eléctricamente neutras que voy a llamar neutrones. (Cabe recordar que la partícula a la cual le quedó fijado este nombre fue descubierta al cabo de dos años. *Nota del Autor*)... El carácter continuo del espectro beta llegará a ser comprensible si se supone que durante la desintegración beta con cada electrón se emite este neutrón, con la particularidad de que la suma de la energía del neutrón y del electrón es constante...

De este modo, querido pueblo radiactivo, examinen y juzguen. Por desgracia, no puedo presentarme en Tubinga personalmente pues mi presencia aquí es indispensable con motivo del baile que tendrá lugar en Zurich en la noche del 6 al 7 de diciembre.

Su seguro servidor W. Pauli".

Como hemos visto, Pauli conjeturó que durante la desintegración beta se emite una partícula poseedora de alta capacidad de penetración y más inatrapable que el cuanto gamma. Esta partícula no la pueden retener las paredes del calorímetro y ella se lleva consigo parte de la energía, del impulso y del momento de impulso. Pronto, el término neutrón fue sustituido por el de neutrino. La palabra "neutrino" (en italiano, es el diminutivo de neutrón y significa "neutrón pequeño, pequeña partícula neutra") entró en usanza de los físicos de la mano de Enrique Fermi. Al principio, éste la empleaba en conversaciones no oficiales, más tarde, en 1931, lo hizo durante la conferencia de Roma dedicada a la física y desde allí este término se difundió por doquier. La nueva partícula comenzó a designarse con el símbolo ν .

Para el momento del Congreso de Solvay el neutrino se afianzó con bastante firmeza en la conciencia de los físicos. Éstos dieron crédito a la existencia de una partícula que carecía de carga eléctrica, tenía una masa muy pequeña y, en general, parecía como si hubiera sido creada por la naturaleza especialmente para esquivar a los experimentadores. Era necesario escribir una vez más las ecuaciones

de la desintegración beta (26), (27) y (28), introduciendo en ésta v:

$$n \rightarrow p + e^{-} + \bar{\nu} \quad \text{desintegración } \beta^{-}, \quad (29)$$

$$p \rightarrow n + e^{+} + \nu \quad \text{desintegración } \beta^{+}, \quad (30)$$

$$p + e^{-} \rightarrow n + \nu \quad \text{captura electrónica.} \quad (31)$$

La ratificación definitiva de la nueva partícula recae en el año 1934, al aparecer el artículo de Enrique Fermi sobre la desintegración beta.

7.4. TEORÍA DE FERMI

En el artículo mencionado, Fermi, basándose en la hipótesis de Pauli, desarrolló una teoría cuantitativa detallada de la desintegración beta. Esta teoría fue estructurada por analogía con la electrodinámica. Así, por ejemplo, Fermi supuso que el electrón y el neutrino nacen en el momento de desintegración en un mismo punto, al igual que los cuantos gamma irradiados por los núcleos. Para la interacción débil el científico introdujo la constante G que desempeñaba el mismo papel que la carga elemental e en los procesos electromagnéticos y, apoyándose en datos experimentales, calculó su valor. La teoría de Fermi permitió calcular la forma de los espectros β y relacionar la energía límite de desintegración con el tiempo de vida del núcleo radiactivo. En esta teoría el neutrino poseía una carga y un momento magnético iguales a cero, una masa en reposo, también igual a cero (o bien, mucho menor que la masa del electrón), y un espín $1/2\hbar$. En los años sucesivos procuraron modificar esta teoría, complementar y hacerla más compleja puesto que parecía que era demasiado sencilla y no describía todos los datos experimentales. Pasó un lapso bastante largo antes de que los físicos se convencieran de que todas estas adiciones se basaban en experimentos erróneos, mientras que el camino adivinado con tanta certeza por Fermi era precisamente el correcto.

La teoría de Fermi no dice nada acerca del mecanismo de interacción: acerca de los cuantos del campo débil, considerando que el neutrino y el electrón nacen en el punto en que se encuentra el nucleón. De este modo, ésta es la primera aproximación plenamente suficiente para el cálculo de los procesos con energías relativamente pequeñas: de la desintegración beta. Pero el tiempo transcurría, y el círculo de reacciones conocidas en las cuales participaba la interacción débil se ampliaba paulatinamente. Así, por ejemplo, resultó que precisamente esta interacción condicionaba la

desintegración de los mesones $\mu^\pm$ y $\pi^\pm$, de las partículas extrañas, etc. El afán de ir adelante y formular la teoría cuántica chocó al principio con grandes dificultades. Sólo hace relativamente poco se logró explicar todo el conjunto de fenómenos dentro de los márgenes de una teoría única de interacciones débiles y electromagnéticas.

7.5. ENRIQUE FERMI

El nombre de Newton está rodeado de leyendas. La más famosa entre éstas se refiere a la manzana que cayó del árbol y, supuestamente, sirvió de impulso al descubrimiento de la ley de la gravitación universal. Esta leyenda la repitió todo el mundo comenzando por Voltaire y terminando por los alegres personajes de Mark Twain. También existen leyendas menos difundidas. Por ejemplo, se considera que las investigaciones experimentales de Newton empezaron ya en la escuela, cuando él, para medir la fuerza del viento, saltaba en dirección del viento y en contra de éste, comparando después las distancias salvadas.

La "técnica" de la realización de este experimento hace recordar, en gran medida, otro caso ocurrido en la quinta década de nuestro siglo. El experimento fue realizado debido a algo mucho más serio (y penoso para la humanidad): se trataba de la explosión atómica.

El 16 de julio de 1945, en el sur del Estado de Nuevo México, científicos y militares norteamericanos llevaron a cabo la primera explosión de una bomba atómica. Los observadores quedaron deslumbrados por la fulguración de la luz, y al cabo de 30 segundos hasta donde se encontraban llegó la onda de choque aérea y un "bramido monstruoso". Sólo una persona no oyó el sonido de la explosión: era Enrique Fermi.

Laura Fermi escribió en sus memorias: "Toda su atención estaba centrada en arrojar pedacitos de papel y observar cómo caen. Precisamente como lo esperaba, la onda aérea que siguió tras la explosión los cogió y arrastró consigo. Cayeron a cierta distancia de Enrique. Él midió con pasos esta distancia y de esta manera determinó el recorrido de los papelitos. Partiendo de estos datos pudo calcular la fuerza de la explosión. Las cifras que obtuvo coincidieron con las indicaciones de los instrumentos precisos y de los contadores".

El nombre de Fermi también está rodeado de leyendas. Por supuesto, mucho más fidedignas. Los trabajos que publicó durante su vida no eran muy numerosos, pero cada uno de éstos constituía una nueva palabra en la física. A Fermi le era inherente una universalidad insólita: siendo el fundador de la teoría de la desintegración beta, encabezó la puesta en funcionamiento del primer reactor atómico en

el mundo; el especialista en la teoría cuántica del campo al rato se convertía en experimentador que investigaba la interacción de los neutrones con la sustancia, etc. Tal vez, el que mejor escribiera acerca de su maestro fue Bruno Pontecorvo. Concluiremos el relato sobre Fermi citando un fragmento del artículo de Pontecorvo:

"Fermi siempre encontraba el enfoque más simple para la solución de las tareas prácticas más complicadas. Y en lo que respecta a las investigaciones de carácter fundamental, los grandes problemas elegidos por Fermi siempre devenían sencillos, aunque esta sencillez, claro está, sólo se revelaba después de que él los resolvía brillantemente.

La aspiración a la sencillez era uno de los rasgos más característicos de su personalidad. En una ocasión, después de un seminario en el que intervinieron teóricos... Fermi dijo dirigiéndose a Segre que se sentía completamente deprimido por su incapacidad de comprender de qué se trataba y tan sólo la última frase: "En ello, precisamente, consiste la teoría fermiana de la desintegración beta", le consoló hasta cierto punto".

Parte II

LOS DETECTORES Y EL NEUTRINO

Capítulo 1

MATERIALES CENTELLEANTES

Y DESCUBRIMIENTO DEL NEUTRINO

1.1. ¿CÓMO REGISTRAR EL NEUTRINO?

En su juventud Pauli tenía gran amistad con el astrónomo Walter Baade. Algún tiempo, incluso, vivieron en una misma casa. Y una tarde, Pauli, muy emocionado entró en casa de su amigo con las siguientes palabras: "He hecho hoy una cosa horrible. Un físico teórico nunca debe hacer nada semejante. He supuesto algo que jamás será posible comprobar experimentalmente". Como habrá adivinado el lector, se trataba del neutrino. A Baade se le ocurrió en el acto que podía proponer a Pauli una apuesta absolutamente segura por una botella de champaña. Se puso a afirmar que el neutrino sería registrado en vida de ellos. Su apuesta era segura porque si el neutrino se registraba después de la muerte de ambos, Pauli no podría disfrutarla, saboreando su bebida predilecta.

Señalemos inmediatamente que el optimismo venció y la champaña fue bebida, tomando parte en ello el experimentador que había registrado el neutrino. Esta historia fue relatada en una de las conferencias de física ya después de la muerte de Pauli.

El capítulo que comenzamos servirá al lector de prueba de que Pauli, aunque poco afortunado en apuestas, era, sin duda alguna, un gran físico.

¿Qué pruebas de existencia del neutrino se requerían para que éste se convirtiese en miembro con plenitud de derechos de la familia de partículas elementales; un miembro como lo es el electrón, el protón o el cuanto gamma? Es que, aparentemente, los experimentos realizados ya al cabo de dos o tres años confirmaron una vez más que en la desintegración beta participa "algo" que arrastra consigo la energía y el impulso.

Uno de los primeros en realizar estos experimentos fue el físico soviético A. I. Leipunski en 1936. Dichos experimentos revestían carácter cualitativo.

Más tarde, A. I. Alijánov y A. I. Alijanián propusieron realizar el siguiente experimento. Durante la captura electrónica del núcleo

escapa tan sólo una partícula, el neutrino. Es natural que en este caso el núcleo experimenta un retroceso, moviéndose en dirección opuesta a la del vuelo de esta partícula. Todos los neutrinos tienen la misma energía, como asimismo los núcleos de retroceso. Éstos pueden ser registrados y la energía, medida. Los físicos soviéticos no lograron poner en práctica los experimentos en cuestión; la guerra lo impidió. En 1942, el norteamericano Allen se valió de una idea análoga, realizando el experimento con el isótopo berilio-7. El científico obtuvo la distribución energética de los núcleos en plena correspondencia con los pronósticos del cálculo.

Muchos experimentadores sometieron también a comprobación la teoría de Fermi en que al neutrino pertenecía el papel fundamental. Pero todo ello no era sino testimonios indirectos. Así y todo, el "neutrino" podía aún ser meramente un juego de palabras cómodo que encubría la infracción de las leyes de conservación en la interacción débil. Una demostración unívoca podía ser dada por un experimento en que esta partícula fuera registrada lejos del punto de su nacimiento. El hecho de hallar en otro punto la energía que faltaba es precisamente lo que demostraría la materialidad y la realidad física de la partícula que la transporta.

Poner en práctica un experimento de este tipo representaba una cosa extraordinariamente difícil, por cuanto la teoría suponía que el neutrino carece de todo: carece de masa, de carga, de momento magnético. Esta partícula no es capaz de ionizar ni de excitar los átomos, mientras que los detectores de partículas elementales son sensibles precisamente a los procesos electromagnéticos. Claro, se quedaban efugios de la siguiente índole: ¿y si el neutrino tiene una carga minúscula, mucho menor que la del electrón? (Nadie daba crédito a esta suposición puesto que todo el mundo creía en la ley de conservación de la carga.) O bien, el neutrino tiene un momento magnético, pero también muy pequeño (en esto era más fácil creer).

Y si no hay ni lo uno ni lo otro, entonces el neutrino es un representante "puro" de las fuerzas débiles, sin propiedades electromagnéticas algunas. Esta partícula puede revelar su presencia sólo en el caso de transferir, por medio de la interacción débil, parte de su energía a partículas cargadas, y éstas ya podrán registrarse. Lo único que quedaba era hallar un proceso adecuado.

Y ya en 1934, para descubrir la presencia del neutrino, se propuso realizar la reacción en que éste entra en interacción con el hidrógeno (con los protones) y engendra un neutrón y un positrón:



Por muchas características, esta reacción tenía gran atractivo.

En primer término, tenía que desarrollarse obligatoriamente (hecho que no se conocía de antemano para otros muchos procesos con el neutrino). De acuerdo con los principios físicos generales, si es posible el proceso (29), o sea, la desintegración del neutrón en protón, electrón y neutrino, entonces, indispensablemente, existe también la reacción inversa (32).

En segundo término, la teoría de Fermi presagiaba que en el flujo de neutrinos de pequeñas energías, digamos, irradiados durante la desintegración β de los núcleos, la probabilidad de este proceso es mucho mayor que la de cualquier otro.

En tercer término, las dos partículas que escapan como resultado de la reacción son bastante "pintorescas", de modo que se puede abrigar la esperanza de registrarlas. La reacción (32) posee un umbral de energía. Esto significa que se desarrolla solamente en el caso de que la energía del neutrino supere 1,8 MeV. No es difícil calcular este umbral: a la diferencia de masas del protón y neutrón igual a 1,3 MeV hay que añadir la masa en reposo del positrón formado igual a 0,5 MeV. Se obtienen 1,8 MeV.

Ahora evaluemos la probabilidad de este proceso inverso. Si consideramos que poseemos una fuente que irradia un haz de neutrinos con una energía de 3 MeV y que este haz incide sobre un blanco, por ejemplo, un metro cúbico de agua (en el agua la concentración de protones es bastante grande), resulta que de 10^{10} partículas —de un trillón de partículas— nada más que una reaccionará en el blanco. Todo se conoce por comparación. Pues bien, entre un centenar de cuantos gamma con la misma energía van a reaccionar con el agua 99. Es difícil afirmar que estas cifras fueran muy esperanzadoras.

A pesar de que la caza del neutrino comenzó inmediatamente después de que Pauli descubrió esta partícula "en la punta de su pluma", los resultados se hicieron esperar veinte años. Durante este lapso los métodos de la física nuclear se transformaron por completo.

En primer lugar, se han creado potentes manantiales de irradiación de neutrinos. Más tarde hablaremos sobre éstos sucintamente. En segundo lugar, aparecieron detectores sensibles que contienen gran cantidad de sustancia: varios metros cúbicos. Sobre el particular hablaremos más detalladamente. Y, por fin, los experimentadores han inventado los métodos para suprimir el fondo. Es que, en efecto, otras partículas, al llegar al detector de neutrinos, también se registran. Del ejemplo que hemos citado antes se ve que la sensibilidad de éste hacia la radiación gamma es de 19 a 20 órdenes mayor que hacia el neutrino. A raíz de ello existe la plena posibilidad de que las reacciones que necesitamos pasen inadvertidas entre un

gran número de otros procesos. Se ha requerido el trabajo de muchos años para aprender a destacar los acontecimientos relacionados con el neutrino de entre los de fondo, basándose en las particularidades específicas de los primeros. Por esta razón no podemos evitar el conocimiento de las fuentes del fondo en los experimentos con el neutrino. Empecemos por orden.

1.2. REACTORES NUCLEARES COMO FUENTES DE NEUTRINOS

Los primeros intentos de registrar el neutrino se realizaban con ayuda de fuentes de radiactividad natural. Se llevaron a cabo una gran cantidad de experimentos. Con frecuencia, en éstos se utilizaban actividades enormes (a escala de aquella época). En 1935, Namias trató de determinar el número de iones que el neutrino engendra en el aire. (¿Y si la partícula tiene momento magnético?) Trabajó con una fuente que contenía 5 g de radio, y el número de neutrinos irradiados por ésta en todas las direcciones era, aproximadamente, de 10^{11} partículas por segundo. Namias no descubrió la ionización. Del experimento se deducía que el recorrido de la partícula hasta la interacción con los átomos del aire superaba el millón de kilómetros y, por consiguiente, su posible momento magnético era muchos órdenes menor que el del electrón.

El 2 de diciembre de 1942, bajo la dirección de Fermi, en EE.UU., fue puesto en funcionamiento el primer reactor nuclear. En la Unión Soviética el reactor comenzó a trabajar el 25 de diciembre de 1946. Los trabajos los encabezó Igor Vasilievich Kurchátov. Para la física y la técnica llegó una nueva era, lo que, por supuesto, atañó también al neutrino.

En el reactor, después de la captura del neutrón, el núcleo de uranio-235 (o de plutonio-239) fisiona en dos fragmentos. Los fragmentos formados, al principio, emiten neutrones y, luego, cuantos gamma, con la particularidad de que estos procesos se desarrollan en un tiempo muy breve. Seguidamente, llega el turno de las desintegraciones beta.

En término medio, cada uno de los fragmentos experimenta la desintegración β tres veces, y, por consiguiente, durante una fisión se irradian seis neutrinos. Sus energías se extienden desde 0 hasta 10 MeV, pero el número relativo de partículas con energía grande es muy pequeño. Si la potencia del reactor es de 1 000 MW (lo que, a escala contemporánea, no es un número muy elevado), al espacio circundante, cada segundo, se emiten $N = 2 \cdot 10^{20}$ neutrinos. Esta radiación, para la cual son absolutamente transparentes las paredes,

la protección, las planchas de hormigón y hasta el propio globo terraqueo, arrastra consigo cerca de 50 MW de potencia, de modo que aquí la expresión de "calentar la calle" puede sustituirse con plena razón por otra más fuerte: "calentar el Universo".

Sobre un detector dispuesto a la distancia $R = 10 \dots 15$ m de la zona activa del reactor incide un haz de neutrinos con $\sim 10^{13}$ partículas a través de 1 cm^2 por segundo ^{*)}. Es muy difícil situar el detector a una distancia más cercana debido a la necesidad de protegerse contra otros tipos de radiación del reactor.

Los físicos obtuvieron un potente manantial de neutrinos. Lo que ahora importaba eran los detectores. Éstos iban desarrollándose ininterrumpidamente, y para detectar los neutrinos se ensayaron los más diversos tipos de instrumentos hasta que quedó claro que el éxito se debe esperar del método de centelleo.

1.3. UN POCO DE HISTORIA

En una habitación oscura se encuentra un hombre. Se inclinó sobre un pequeño aparato observando a través de una lupa las fulguraciones de la luz en una pantalla de sulfuro de cinc. De esta manera cuenta las partículas alfa procedentes de un preparado radiactivo dispuesto a varios milímetros de la pantalla. La luz originada por una partícula es tan débil que el investigador tiene que permanecer durante horas en la oscuridad para que los ojos se acostumbren a distinguirla bien.

Éste fue el primero de los detectores de partículas elementales que lleva el nombre de espintariscopio de Crookes. Precisamente con ayuda de este instrumento fue descubierto el núcleo atómico. Claro está que dicho instrumento servía sólo para contar acontecimientos raros, dos por segundo, como máximo. Tampoco era posible efectuar observaciones durante un lapso bastante prolongado. Rutherford recordaba que no era capaz de aguantar más de dos minutos, al cabo de este tiempo los ojos le comenzaban a lagrimear debido a la tensión por lo que tenía que descansar. Como campeón del laboratorio en esta clase de deporte se consideraba Geiger. Pero éste despreció sus laureles de campeón e inventó el tubo de descarga en los gases, el contador de Geiger, que por un largo período desplazó en el uso

^{*)} Aquí entra en acción la ley de disminución con el cuadrado de la distancia. Por cuanto los neutrinos no son retenidos por ningún obstáculo, su haz h a través de 1 cm^2 por segundo es

$$h = \frac{N}{4\pi R^2} = \frac{2 \cdot 10^{20}}{4\pi (1500)^2} = 3 \cdot 10^{13}.$$

práctico el método de fulguraciones denominado método de centelleo.

En 1944, Curran y Baker adaptaron para contar los centelleos un instrumento electrónico llamado fotomultiplicador que registraba los destellos luminosos. En comparación con el hombre, el fotomultiplicador poseía ventajas indudables: rapidez, fiabilidad y mayor sensibilidad. La luz proveniente de cada partícula se transformaba en impulso eléctrico y, seguidamente, unos aparatos electrónicos especiales contaban estos impulsos. Desde este momento, el método de centelleo restablecido comenzó su marcha triunfal en la física nuclear y la física de las partículas elementales.

En 1947, Kallman sustituyó la pantalla de sulfuro de cinc por un cristal de naftaleno, transparente para su propia radiación. Ahora la luz partía no de la superficie, sino de todo el volumen del cristal. Se ofreció la posibilidad de registrar no sólo las partículas alfa de recorrido corto, sino también las radiaciones beta y gamma. Por cierto, esta última se absorbía mal en el naftaleno, por cuanto esta sustancia tiene el valor de Z demasiado pequeño (para el carbono $Z = 6$). Sin embargo, los nuevos descubrimientos no se hicieron esperar, y ya en 1948, Hofstädter puso en claro que el cristal de yoduro sódico NaI (con Z efectivo igual a 50) con pequeñas impurezas de talio es un magnífico material centelleante para la radiación gamma y da una fulguración luminosa muy intensa. En un plazo breve se elaboraron muchos tipos de materiales centelleantes. Orgánicos: cristales; líquidos, materias plásticas. Inorgánicos: cristales. Aparecieron detectores especiales de neutrones. El método de centelleo encontró una cantidad muy variada de aplicaciones. Actualmente, se emplea en geología, medicina, agricultura, etc.

1.4. CÓMO SE TRANSFORMA EN LUZ LA ENERGÍA DE LAS PARTÍCULAS

Ya es conocido el cuadro del paso de una partícula cargada a través de la sustancia: ésta deja en su huella átomos ionizados y excitados. Durante su transición al estado fundamental los átomos excitados pueden irradiar cuantos, y los ionizados, captar electrones (recombinar) e, igualmente, irradiar. De este modo, una parte de la energía perdida por la partícula se transforma en luz. Para el material centelleante es importante que esta parte sea lo suficientemente grande y que la luz no se absorba en la sustancia, sino que salga fuera de sus límites, cayendo en el fotomultiplicador. Los procesos de transformación de la energía de la partícula en luz se diferencian considerablemente para los materiales centelleantes orgánicos e inorgánicos. Aquéllos son bastante complejos de modo que hasta la

fecha atrae la atención de los científicos una serie de detalles no dilucidados.

Así pues, una parte de la energía de la partícula, E se transformó en energía de la luz ΔE que puede salir fuera de los márgenes del material centelleante. El hecho de cuán grande es esta parte depende de una serie de factores, en particular, de la naturaleza del material centelleante y de la clase de la partícula^{*)}. Para los electrones y para el cristal más "eficaz", el yoduro sódico, $\Delta E/E$ es cerca de 10%, y para el cristal de antraceno ($C_{14}H_{10}$), 4%. La mayoría de los materiales centelleantes a base de líquidos y materias plásticas, dan el valor de $\Delta E/E$ dentro de los límites de 1 a 2%. El resto de energía se pierde para el registro. Sin embargo, es de suma importancia el que la luz, a pesar de todo, transporte información acerca de la energía dejada por la partícula. Esta circunstancia permite graduar el contador valiéndose de fuentes con energía conocida para, luego, determinar la de las partículas investigadas. Más tarde hablaremos de cómo es esto en la práctica.

El tiempo de emisión de cuantos de luz por el material centelleante es bastante pequeño. Para los cristales inorgánicos la mayor parte de los cuantos escapa a los 10^{-6} s, y para las sustancias orgánicas, a los 10^{-8} s. De este modo, pueden registrarse grandes actividades sin temer que las fulguraciones provenientes de las diferentes partículas se superpongan.

1.5. EL CONTADOR DE CENTELLEO MODERNO

Analicemos ahora, consecutivamente, cómo la energía dejada por la partícula en el contador de centelleo se transforma en señal eléctrica. Para este fin fijémonos en la fig. 10, en la cual viene representado el esquema de un contador de centelleo moderno con el cristal de NaI. Supongamos que cien cuantos gamma emitidos por el preparado radiactivo cesio-137 inciden sobre este cristal y que vuelan uno tras otro en un haz estrecho y paralelo. La energía de cada uno de éstos constituye $h\nu = 661$ keV. Averigüemos su destino. Cada uno de los cuantos, a guisa de caballero andante en una encrucijada, debe seguir uno de los tres caminos: producir el efecto fotoeléctrico, experimentar la dispersión de Compton o escapar del cristal sin entrar en interacción. Ahora bien, el caballero andante elige su camino ateniéndose al deseo del autor del cuento, en tanto que las probabilidades de los procesos con los cuantos gamma se determinan por la

^{*)} A veces, también, de la energía de la partícula. Por ahora, sin embargo, no abordaremos esta posibilidad.

energía de éstos, así como por el material del contador de centelleo y sus dimensiones. Si tomamos un cristal de espesor $\delta = 5$ cm, entonces, 9 cuantos producirán el efecto fotoeléctrico, 68 se dispersarán y 23 volarán a través del cristal sin dejar energía. (En general, cuanto mayor es δ tanto menor es la probabilidad del tercer proceso, y la relación de los dos primeros depende tan sólo de $h\nu$ y Z del cristal.) En el caso del efecto fotoeléctrico prácticamente toda la energía del cuanto se transferirá al electrón cuyo recorrido es muy pequeño (< 1 mm). De este modo, esta parte de energía, de inmediato, quedará en el contador de centelleo.

El cuanto que experimentó la dispersión de Compton perderá, en término medio, 230 keV, después de lo cual otra vez tendrá ante sí tres posibilidades. Con la particularidad de que ahora su energía es menor y la probabilidad del efecto fotoeléctrico es más alta, etc., etc. Los procesos que hemos descrito se operan durante un lapso mucho

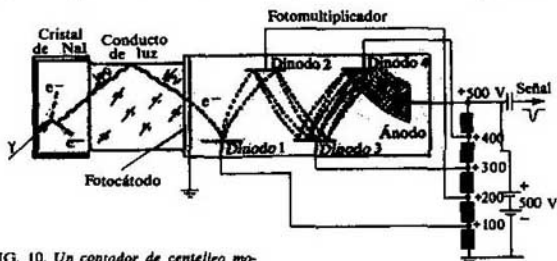


FIG. 10. Un contador de centelleo moderno.

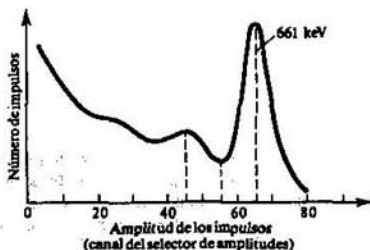


FIG. 11. Espectro de energía del cesio-137 en la pantalla del selector de amplitudes.

menor que el tiempo de desexcitación de las moléculas excitadas del contador de centelleo.

Ahora fijémonos en la pantalla del selector de amplitudes, instrumento que parece como si nos permitiese ver la distribución de energías de los impulsos luminosos que surgen en el cristal. El rayo electrónico pinta el cuadro representado en la fig. 11. El pico a la derecha corresponde al caso en que toda la energía del cuanto gamma, igual a 661 keV, quedó en el cristal. En esta ocasión los impulsos luminosos son próximos por su magnitud. En cambio, si el cuanto experimentó la dispersión, escapando del cristal, los impulsos luminosos engendrados por los electrones Compton tendrán un valor menor. Son precisamente éstos los que forman la "cola" izquierda del espectro. De aquí se ve claramente cómo se puede graduar la escala energética del selector valiéndose del pico de la absorción total.

Retornemos a la fig. 10. El cristal está colocado en una caja metálica fina a través de la cual penetran libremente los cuantos gamma, pero no pasa la luz. Por un lado de la caja ésta tiene una ventana de vidrio. Por los demás, entre la caja y el cristal se encuentra un reflector: en la mayoría de los casos, polvo blanco de óxido de magnesio. Esta estructura permite concentrar en el fotomultiplicador la mayor cantidad posible de luz.

El fotomultiplicador es un instrumento sensible. Su funcionamiento se perturba a temperaturas altas o muy bajas y en la zona de campos magnéticos grandes. Puede quedar destruido a grandes presiones, etc. Debido a ello, a veces, surge la necesidad de alejar el cristal del fotomultiplicador. En estos casos se hace uso de los conductos de luz uno de los cuales está representado en las figs. 10 y 12. Es un cilindro macizo fabricado de plástico transparente con superficies pulidas. Sus caras frontales están unidas con cola óptica, una al vidrio del cristal y otra a la ventana de entrada del foto-



FIG. 12. Marcha del rayo en el conducto de luz. Reflexión interna total (α es el ángulo de reflexión interna total). Para

$\beta \geq \alpha$ la luz no sale fuera de los límites del conducto luminoso.

multiplicador. El conducto de luz utiliza el efecto de reflexión interna total. El rayo de luz que incide sobre la superficie de separación plástico-aire, formando un ángulo mayor que α (α es el ángulo de reflexión interna total), ya no puede salir fuera de los límites del conducto y después de reflejarse varias veces va a parar al fotocátodo del fotomultiplicador. La fig. 12 da a entender cómo se realiza este proceso.

De este modo la luz, a través del conducto de luz, se concentra en la ventana de entrada del fotomultiplicador. Este último, en la mayoría de los casos, consiste en un cilindro de vidrio bombeado hasta alcanzar un alto vacío y después soldado. La cara frontal opuesta a la de la ventana de entrada está atravesada por los contactos de los electrodos.

El fotomultiplicador en el contador de centelleo desempeña un papel doble: transforma el impulso luminoso en eléctrico para, luego, amplificar este impulso eléctrico. En correspondencia con ello en el fotomultiplicador se utilizan dos fenómenos físicos: el efecto fotoeléctrico y la emisión electrónica secundaria. El cuanto de luz, al atravesar la ventana de vidrio (a veces, de cuarzo) del fotomultiplicador incide sobre el fotocátodo, una capa semitransparente que recubre el lado interior. Actualmente, se han elaborado muchos tipos de fotocátodos y en la mayoría de los casos éstos se fabrican a base de los compuestos de metales alcalinos con antimonio. Esta capa es especialmente sensible a la luz del centelleo, poseyendo un trabajo de salida pequeño. Debido al efecto fotoeléctrico externo, los cuantos arrancan electrones los cuales se aceleran por la tensión aplicada (enfocándose simultáneamente) en el intervalo hasta el siguiente electrodo, el 1^{er} dinodo. La superficie del dinodo está cubierta por una sustancia cuyo coeficiente de emisión secundaria σ (es decir, el número de electrones arrancado por un electrón incidente) es grande. El valor de σ depende de la energía de los electrones primarios siendo, aproximadamente, igual a 3 cuando la tensión aceleradora es de 100 V. Los electrones arrancados se dirigen al 2^o dinodo, acelerándose por la tensión aplicada, y todo se vuelve a repetir. Si el fotomultiplicador tiene 10 dinodos, al último electrodo, el ánodo, llegan, por término medio, $3^{10} \approx 6 \cdot 10^4$ electrones engendrados tan sólo por un electrón escapado del fotocátodo. La fig. 10 representa también el método de suministro de tensión a los electrodos del fotomultiplicador empleando una fuente ($u \approx 500 \dots 2000$ V) y un divisor a partir de resistencias. El impulso eléctrico del ánodo llega al circuito electrónico y, finalmente, a la pantalla del selector.

El contador de centelleo desempeñó un papel importante en las

investigaciones relacionadas con la física nuclear y la física de las partículas elementales.

Se puede enumerar toda una serie de destacados experimentos donde se hizo uso de este instrumento.

1. Descubrimiento del antiprotón y del antineutrón (experimentos de Segre y de otros investigadores).

2. Registro del neutrino procedente del reactor nuclear (experimentos de Reines y Cowan).

3. Demostración de la no conservación de la paridad en las interacciones débiles (experimento de Wu y otros).

4. Dispersión de los neutrinos en el electrón (experimento de Reines y otros).

5. Experimentos subterráneos con neutrinos cósmicos.

6. Experimentos referentes a la búsqueda de la desintegración beta doble, etc.

1.6. MATERIAL CENTELLEANTE PARA EL NEUTRINO

Ya nos hemos referido a que los años cincuenta fueron un período de desarrollo impetuoso de la técnica de cómputo por medio de centelleo. La atención de los físicos dedicados a la caza del neutrino se centró, al principio, en los contadores de centelleo líquidos. La cuestión residía en que el cultivo de los cristales, tanto orgánicos, como inorgánicos, era una cosa complicada y costosa. Y se necesita una cantidad muy grande de éstos. Otra cosa son los líquidos, aunque también con ellos se experimentaron grandes dificultades. En los contadores de centelleo a base de líquidos, el propio disolvente (tolueno, benceno, decalina, etc.), por regla general, acusa propiedades de centelleo muy débiles y es necesario introducirle adiciones especiales, activadores, que "interceptan" la energía de las moléculas del disolvente, transformándola eficazmente en luz. La elaboración de soluciones tan complejas por su composición requirió mucho tiempo. Además, todos los componentes del líquido centelleante debían presentar una pureza química elevadísima, de modo que tanto los químicos, como los físicos sufrieron muchos contratiempos antes de aprender a obtener en grandes cantidades los líquidos en cuestión.

Ahora sólo nos quedan unas páginas antes de abordar el experimento con el neutrino, nos queda nada más que un paso. No se puede prescindir de él ya que, de lo contrario, será imposible comprender la belleza del experimento y el esfuerzo y talento de los experimentadores.

Así pues, hablemos sobre el fondo.

1.7. FUENTES DEL FONDO

El problema del fondo preocupa no solamente a los físicos que se dedican al estudio del neutrino. Además de los físicos, le prestan también atención los químicos, biólogos y técnicos. La exactitud de cualquier medición de una actividad pequeña siempre depende de en qué medida se logra atenuar el fondo. Y para atenuarlo, es necesario conocer bien su naturaleza, así como las propiedades de las partículas que lo constituyen. Se podrían evocar muchos casos tristes en que el fondo que no se tuvo en cuenta se tomaba por un efecto, el cual, en realidad, no existía. Esta circunstancia conducía a resultados completamente erróneos de las mediciones. Y nacían noticias sensacionales, a veces de vida muy corta, pero a veces tales que, para refutarlas, se exigían años. ¿Para qué ocultarlo? Casos semejantes pueden encontrarse tanto en la historia de las investigaciones del neutrino, como en los experimentos dedicados a la desintegración beta. El lector recordará que hemos hablado de que la teoría de Fermi se sometió varias veces a revisión y que la "corregían" y complicaban. A ello contribuyó en grado bastante considerable el hecho de que no se tenían debidamente en cuenta los procesos del fondo. En fin de cuentas, aparatos más perfectos confirmaron la genial intuición de Fermi.

La primera componente del fondo está relacionada con la radiación cósmica. Ya nos hemos referido a que ésta se pudo detectar gracias a la descarga de los electros copios, así como a los contratiempos que deparaba a los físicos que en el siglo XIX experimentaban en el campo de la electricidad (por ejemplo, a Ch. Coulomb). Pero llegó el momento en que los físicos esclarecieron la causa del fondo.

El inatrapable "saboteador" se convirtió en fiel aliado de los físicos. Antes de crear los aceleradores de partículas elementales, los rayos cósmicos eran el único manantial de radiación de gran energía. Los experimentos con estos rayos posibilitaron la comprensión de muchas leyes generales del micromundo y el descubrimiento de nuevas partículas elementales: el positrón y los mesones μ y π . Los físicos soviéticos D. V. Skobeltsin, L. D. Landau, I. E. Tamm y otros investigaron y explicaron un fenómeno interesantísimo: los chaparrones cósmicos. Más tarde volveremos al problema de la radiación cósmica y, mientras tanto, ésta nos interesará tan sólo como fuente del fondo en los experimentos con los neutrinos. Los flujos de partículas provenientes del cosmos inciden sobre la frontera de la atmósfera terrestre. Aquellas de las partículas que poseen suficiente energía y están en condiciones de evadir la profunda trampa: el

campo magnético de la Tierra, se dirigen veloces a la superficie de nuestro planeta. Y en la acción recíproca con los núcleos de oxígeno y nitrógeno engendran nuevas partículas.

¿Qué es, entonces, lo que registra un observador en el laboratorio? Este ve que la radiación se divide en tres componentes: los electrones, positrones y cuantos gamma representan la componente blanda; las partículas que participan en la interacción nuclear—los nucleones y mesones π —son la componente nuclear, y, finalmente, los mesones μ positivos y negativos son la componente dura. Ya los propios nombres sugieren la posibilidad de proteger el detector contra cada una de estas componentes. La blanda se absorbe por una capa de plomo de 10 a 15 cm de espesor (protección pasiva). Más difícil es librarse de la componente nuclear, para su absorción se necesitan 2 ó 3 m de hierro, o bien, de 15 a 20 m de agua. Por este motivo, si se ofrece tal posibilidad, el detector se ubica en un local subterráneo. Quedan los muones (mesones μ) de grandes energías que penetran profundamente bajo tierra. La lucha contra éstos se libra por medio de la llamada protección activa. Se trata de rodear la instalación, sobre todo por encima, ya sea con recipientes que contienen líquido centelleante o con placas fabricadas de plástico centelleante o bien con contadores de Cherenkov o de gas. Los mesones que alcanzan el detector principal pasan con gran probabilidad a través de los detectores de protección activa, registrándose en estos últimos. El circuito electrónico capta el momento en que los impulsos del detector principal y de los de protección coinciden en el tiempo y refiere este acontecimiento a los de fondo. No se consigue suprimir por completo el fondo mesónico, puesto que la eficacia del registro por la protección activa no puede llegar al 100%, sin embargo, se logra disminuirlo en centenares y miles de veces.

Ahora debemos relatar muy sucintamente sobre el fondo de la radiactividad natural. Los elementos radiactivos naturales están presentes, en estado disperso, en todos los materiales de la instalación, de la protección, en el aire y en los propios experimentadores. (Se cercioraron de lo último también valiéndose de grandes contadores de centelleo, al medir la radiactividad del hombre. Ésta constituye cerca de 3000 partículas por segundo.) En la naturaleza existen tres familias de elementos que poseen radiactividad natural: de uranio y radio, de torio y de actinio. Cada familia es una serie de átomos que experimentan una desintegración consecutiva y se transforman en otros elementos, miembros de la serie. También se dan isótopos radiactivos aislados creados en la atmósfera por la radiación cósmica que no forman parte de estas familias. Por fin, hay un isótopo muy adverso para una serie de experimentos, el potasio-40. La mayor

cantidad de potasio la contienen los vidrios, el fotomultiplicador y las resistencias del divisor de este instrumento. Al mismo tiempo, para los biólogos el potasio-40 es un verdadero hallazgo, por cuanto por su radiación muy característica se pueden observar las variaciones de la radiactividad del cuerpo humano. Esta propiedad se aprovecha en los casos cuando el hombre fue sometido a irradiación o estuvo en condiciones insólitas donde su metabolismo cambió, por ejemplo, en el cosmos.

Si analizamos la fig. 13, podemos formarnos la idea acerca de la aportación al fondo de diferentes fuentes de radiación natural. En esta figura se representa el espectro de energía del fondo de un cristal de yoduro sódico, así como los espectros de las distintas componentes del fondo que hacen su aportación al número total de impulsos: de los muones cósmicos y de la radiactividad natural, o sea, de las series de

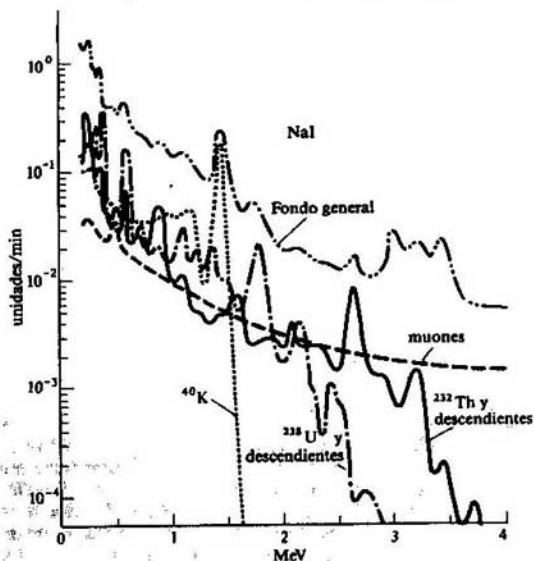


FIG. 13. Espectro del fondo de la radiactividad natural y de los muones cósmicos en un cristal de yoduro de sodio.

uranio y torio y de ^{40}K . Desde 4 hasta 9 MeV se observan picos originados por las partículas alfa de las impurezas internas del cristal. Se debe prestar atención a la escala de referencia, pues ésta es logarítmica. Dicha escala se eligió para mostrar mejor el fondo en la zona de altas energías. De no ser así, debido a que, al pasar de la energía de 0,5 MeV a la de 3 MeV, el fondo disminuye 30 veces, careceríamos de la posibilidad de ilustrarlo.

Los materiales centelleantes orgánicos contienen una cantidad mucho menor de impurezas radiactivas que los cristales inorgánicos. Con mayor frecuencia, su fondo está relacionado con la radiación externa.

El tercer tipo del fondo guarda relación con la propia fuente de neutrinos. Durante la fisión de los fragmentos de uranio en la zona activa del reactor se emiten las más diversas partículas. De ellas penetran a través de la protección biológica los cuantos gamma y neutrones rápidos. Si consideramos que en los locales protegidos del reactor el número de neutrones rápidos es cien veces menor que la norma límite admisible para el personal, la probabilidad de que sean registrados en un detector con material centelleante orgánico sigue siendo todavía un millón de veces mayor que para el neutrino. Esta superioridad debe compensarse con una protección complementaria. Es que el fondo relacionado con el trabajo del reactor es uno de los más desagradables. No puede medirse separadamente del efecto, desconectando el reactor, como se hace para otros fondos. Surge simultáneamente con el neutrino y, por lo tanto, debe tenerse en cuenta con especial meticulosidad.

1.8. LA TAN ANSIADA VICTORIA

Los físicos norteamericanos, Reines y Cowan, contribuyeron a que Pauli perdiese su apuesta. En 1953, estos físicos, por primera vez, registraron el neutrino lejos del lugar de nacimiento de esta partícula.

Para detectar el $\bar{\nu}$ ellos se valieron de la reacción inversa a la desintegración beta del neutrón que hemos discutido al principio de este capítulo:



De fuente de neutrinos sirvió un potente reactor nuclear en el centro atómico de Los Alamos.

Para comprender el principio del registro examinemos la fig. 14. El neutrino que parte del reactor incide sobre el blanco que es un recipiente de plástico con 200 litros de agua. En el agua está disuelta una sal de cadmio CdCl_2 . De la interacción del neutrino con el hi-

drógeno (p) se forman un neutrón y un positrón. Este último en la práctica decelera inmediatamente, entra en la reacción de aniquilación con un electrón del medio, y dos cuantos gamma, cada uno con la energía de 0,5 MeV, salen volando en sentidos opuestos. El blanco era lo suficientemente delgado como para que los cuantos escapados de éste diesen en los recipientes con el líquido centelleante instalados a ambos lados del blanco. Cada recipiente contiene 1400 litros de líquido. Su superficie interior está recubierta de material reflector con el fin de que sobre los fotocátodos de los 110 fotomultiplicadores que "observan" el recipiente se concentre la mayor cantidad posible de luz de centelleo. Para nivelar el flujo luminoso, los fotomultiplicadores están separados del líquido centelleante por los conductos luminicos, y para éstos sirve de material el disolvente puro (sin adiciones centelleantes).

La primera noticia sobre el registro de los neutrinos la envían los cuantos gamma con determinada energía que son producto de la aniquilación y que se registran simultáneamente en los detectores. ¿Es esto suficiente? No, no lo es. A pesar de que el detector se encontraba protegido por plomo y hormigón, el número de impulsos del fondo que imitaban la aparición del positrón en el blanco superaba todavía decenas de veces el efecto esperado.

Esta fue la razón de que se hiciera necesario recurrir también a los "servicios" del neutrón. Este se retarda rápidamente en el agua—en varias millonésimas partes de segundo—y se capta por el núcleo de cadmio. El cadmio fue introducido en la composición del blanco precisamente porque capta con una probabilidad muy grande los neutrones lentos y como resultado de este proceso irradia varios

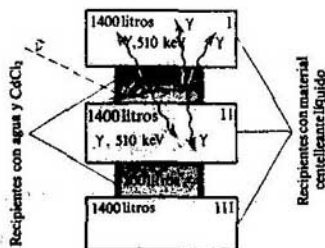


FIG. 14. Esquema del registro de los neutrinos en los experimentos de Reines y Cowan (A es el punto de absorción de

ν y de aparición de e^+ y n ; B, el punto de aniquilación de β^+ , y C, el de captura del neutrón por el núcleo de cadmio).

cuantos gamma con alta energía. Estos últimos también van a parar en los detectores de centelleo y se registran.

Ahora el acontecimiento relacionado con el neutrino puede destacarse del fondo con arreglo a los siguientes rasgos:

1. En los detectores aparecen simultáneamente impulsos que, por su energía, corresponden a los cuantos debidos a la aniquilación.

2. Al cabo de un tiempo determinado en los detectores, también simultáneamente, aparecen impulsos, cuyo valor se encuentra en el diapasón prefijado. Estos impulsos están relacionados con la captura del neutrón por el núcleo de cadmio.

Las energías determinadas, la coincidencia en el tiempo, el retardo entre el primer acontecimiento y el segundo todas estas particularidades de la reacción (32) permitieron atenuar con éxito el fondo y registrar el neutrino. En el experimento se hizo uso de dos blancos de agua con tres detectores de centelleo puestos entre éstos. La masa total de la instalación, además de la protección exterior de plomo, superaba las 10 t, mientras que el cómputo de acontecimientos útiles constituía nada más que 1,7 unidades en una hora, es decir, ¡40 unidades en 24 horas! A la par de ello, el número total de reacciones (32) en los 400 litros de agua debería ser de 2000. Esta disminución del efecto tuvo lugar a raíz de que luchando contra el fondo se tuvieron que introducir demasiados criterios para la selección de los acontecimientos útiles, con lo cual se reducía la eficacia del registro de los neutrinos. Citemos un ejemplo simple. El cuanto gamma, producto de la aniquilación, puede perder parte de su energía en el blanco de agua y puede escapar del detector de centelleo dejando en éste tan sólo una parte de su energía. Por cuanto se seleccionan los acontecimientos los cuales producen un impulso que corresponde a las pérdidas de energía en el detector iguales a 0,5 MeV, el circuito electrónico no lo calculará.

La eficacia del registro de los neutrinos se calculaba y se comprobaba en experimentos de control. Se realizó un gran número de éstos. Por ejemplo, para determinar la componente más peligrosa del fondo: la proveniente del fondo del reactor, entre la zona activa y la instalación se interponía una protección adicional maciza. Dicha protección debilitaba los flujos de todas las partículas, a excepción del neutrino. Y si estas partículas, a pesar de todo y de una forma ingeniosa, imitan los acontecimientos observados, entonces, el número de acontecimientos en cuestión disminuye. El resultado tranquilizó a los físicos: la magnitud del efecto quedó al nivel de 40 unidades en 24 horas. El experimento, junto con los ensayos de control, duró 2085 horas, es decir, cerca de tres meses de tiempo neto.

La exactitud del experimento no era muy grande, mas permitió

afirmar que la probabilidad de la interacción del neutrino con el protón está en concordancia con los pronósticos de la teoría de Fermi. (Cabe señalar que precisamente los trabajos de Reines y Cowan encaminados a la creación de un detector de neutrinos abrieron el camino a los contadores con grandes volúmenes de líquido centelleante a la física, biología y otras ciencias. Puede servir de ejemplo uno de los detectores de radiactividad del cuerpo humano. La persona se ubica dentro del tubo de este contador de cerca de dos metros de largo. Las paredes del tubo son dobles y entre éstas se encuentra una capa de líquido centelleante de 15 cm de espesor. Más de cien fotomultiplicadores registran los destellos luminosos producidos por los cuantos gamma del potasio-40.)

Durante los años 1959–1968 un grupo de físicos encabezado por Reines estuvo ocupado en precisar los resultados experimentales de la investigación de la reacción (32). Simultáneamente, comenzó la preparación de otros experimentos con neutrinos procedentes del reactor: la búsqueda del proceso de dispersión del neutrino en el electrón (interacción $(\nu e)(\bar{\nu} e)$) y el estudio de la interacción del ν con el núcleo del átomo de hidrógeno pesado, el deuterón. En el primer caso fue construido un detector de centelleo de sensibilidad única en su género del cual hablaremos brevemente en las páginas siguientes.

1.9. EL NEUTRINO SE DISPERSA EN EL ELECTRÓN

Sobre la mesa se encuentran dos pequeños volúmenes intitulados "Bibliografía del neutrino". En estos volúmenes están recogidos los títulos de todos los artículos dedicados a esta partícula en un periodo de tiempo de treinta años.

Año 1930. La primera carta de Pauli, único trabajo de ese año.

Año 1934. Además del trabajo de Fermi, referente a la teoría de la desintegración beta, 20 artículos más. Crece la popularidad de esta enigmática partícula y su carácter misterioso impulsa a los científicos a crear las más audaces hipótesis. Por ejemplo, "Teoría neutrínica de la luz" (un número bastante grande de trabajos).

Año 1936. Otra prueba indirecta de la existencia del neutrino. Se trata del trabajo del físico soviético A. I. Leipunski. En su experimento se demostró cualitativamente que los núcleos durante la desintegración β experimentan el retroceso de una forma tal que éste no puede explicarse por el escape de una sola partícula cargada.

La detección del neutrino libre corresponde al año 1953. Además

del famoso artículo de Reynes y Cowan, hay unos 60 trabajos más.

Pero llega la hora en que en la física del neutrino comienza a sonar, cada vez con mayor fuerza, un nuevo tema: se discute la posibilidad de dispersión del neutrino en el electrón. Entre los 236 libros y artículos publicados en 1964 muchos se refieren a este proceso. El mismo año se publicó también el libro del académico M. A. Márkov en el cual leemos:

"Aunque el análisis detallado de las posibilidades que se abren debido a la existencia de la interacción ($e\bar{\nu}$) ($e\bar{\nu}$) recuerdan mucho la situación de meter al pájaro en la cazuela antes de cazarlo, no obstante, la discusión de los diversos efectos originados por la interacción resulta muy valiosa desde el punto de vista heurístico.

...Se quiera o no se quiera, mas las tendencias en el desarrollo de la física de las interacciones débiles condujeron a que la detección de la interacción ($e\bar{\nu}$) ($e\bar{\nu}$) — por ahora inventada — pasa a ser un problema experimental de importancia fundamental".

Esta reacción tiene el siguiente aspecto:

$$\bar{\nu} + e^{-} \rightarrow \bar{\nu}' + e^{-}, \quad (33)$$

es decir, se espera que el neutrino que irrumpe se dispersa en el electrón perdiendo parte de su energía ($\bar{\nu}'$ designa al neutrino con una energía menor que la del $\bar{\nu}$). Si bien el proceso de desintegración inversa (experimento de Reines y Cowan) se deduce de los principios físicos más generales, de la existencia de la dispersión del neutrino en el electrón de antemano se conocía mucho menos. Por supuesto, los físicos anhelaban que, por analogía con la electrodinámica, las fuerzas débiles condujeran a una especie de efecto Compton en el cual el papel del cuanto gamma lo desempeñaría el neutrino en dispersión. En este caso se abriría la posibilidad a un gran número de procesos interesantísimos (por ejemplo, la creación por el neutrino volante de pares electrón — positrón), de gran valor para la física de las partículas elementales y la astrofísica.

La reacción (33) se descubrió con carácter fidedigno veintitrés años después de los experimentos de Reines y Cowan, y catorce años después de que la idea del registro fuera publicada por Reines. Durante este periodo iba verificándose la creación y el perfeccionamiento del detector, así como la acumulación de resultados experimentales.

La probabilidad de la dispersión ($\bar{\nu}e^{-}$) ($\bar{\nu}e^{-}$) para los neutrinos procedentes del reactor es decenas de veces menor que la del proceso $\bar{\nu} + p \rightarrow e^{+} + n$. Como producto de reacción interviene el electrón de retroceso, circunstancia que no permite aprovechar un sistema tan complejo de selección de acontecimientos útiles y de atenua-

ción del fondo como se hiciera en el experimento de Reines y Cowan.

Si analizamos un detector de centelleo bien protegido de cien litros de capacidad situado en un flujo de neutrinos de $10^{13} \text{v/cm}^2 \cdot \text{s}$, resultará que el número de dispersiones de los neutrinos en el electrón será en él de cinco unidades por hora. Mientras tanto, el fondo, en la región a la cual corresponde el número principal de neutrones, es decir, desde 0,2 hasta 1,5 MeV, será cien mil veces (!) mayor. He aquí la evaluación cuantitativa de las dificultades que tiene ante sí el experimentador incluso en el caso de que los vaticinios sean justos.

¿Qué es, entonces, lo que propuso Reines? El científico consideraba que sería mejor utilizar para el registro un material centelleante orgánico que sirviera simultáneamente de detector y de blanco. En este caso el fondo estaría condicionado por los rayos gamma provenientes del medio circundante y no por las impurezas internas, como, por ejemplo, en el caso del NaI. La separación del efecto y del fondo puede basarse en la diferencia entre la señal debida a los cuantos gamma y la obtenida de los electrones de retroceso engendrados por el antineutrino. O, hablando con mayor precisión, en la diferencia de sus recorridos en la sustancia. El esquema de la parte central de la instalación, más precisamente, el propio detector de neutrinos, está representado en la fig. 15.

El material centelleante plástico está dividido en secciones aisladas de la luz. La luz proveniente de cada una de éstas, a través del conducto luminico de yoduro sódico y otro ordinario va a parar al fotomultiplicador. Un acontecimiento neutrínico es el centelleo en una, y solamente en una, sección debido a que el recorrido de un

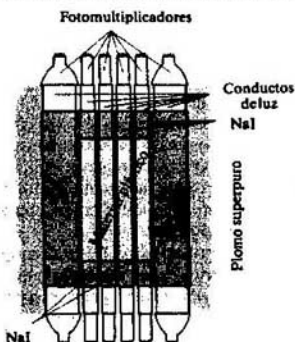


FIG. 15. Esquema de la instalación en los experimentos del grupo de Reines cuyo fin era la observación de la dispersión del antineutrino en el electrón.

electrón con una energía de varios MeV, con gran probabilidad, cabe enteramente en el material centelleante plástico.

Cuando a la instalación llega un cuanto gamma, éste, en la mayoría de los casos, se registra en la protección activa de yoduro sódico que, en forma de capa gruesa, rodea el plástico por todos los lados. Se entiende que cuando esto tiene lugar en los cristales de protección, dispuestos por las caras laterales, el sistema lo registra como un impulso de fondo. Ahora bien, si el centelleo se origina en uno de los conductos de luz, ¿cómo se puede distinguirlo del impulso producido por el neutrino? En este caso se hace uso del hecho de que los impulsos luminosos provenientes del NaI y del material de centelleo plástico son diferentes en cuanto al carácter de su incremento y disminución en el tiempo. Un circuito electrónico especial lo separa, considerando el primero como fondo.

Finalmente, si el cuanto gamma entró en interacción en el propio material plástico, entonces, con gran probabilidad, este hecho tendrá lugar por medio del efecto Compton. En este caso el cuanto dispersado será registrado otra vez en el detector. Y cualesquiera acontecimientos dobles se consideran relacionados con el fondo.

El detector estaba rodeado de una protección pasiva: de plomo y cadmio (para absorber los neutrones). La protección activa exterior consistía en un recipiente con más de dos toneladas de líquido centelleante en el cual, precisamente, se sumergía toda la instalación. Todas estas medidas permitieron reducir el fondo en decenas de veces y descubrir el efecto.

Con el reactor conectado el cálculo de los acontecimientos unitarios arrojaba el resultado de 47 unidades en 24 horas, y con el desconectado, 40. La diferencia entre éstos, igual a 7 unidades en 24 horas, correspondía a los acontecimientos neutrínicos. Se podía considerar demostrada la existencia de este interesante proceso. Nos queda hacer constar que la observación de la dispersión del neutrino en el electrón es uno de los logros cimeros de la técnica de centelleo y de la de registro de las actividades pequeñas.

Capítulo 2

LA RADIOQUÍMICA, EL SOL Y EL NEUTRINO

2.1. OTRA VEZ UN POCO DE HISTORIA

En este capítulo nos enteraremos de los experimentos en los cuales los científicos se las ingeniaron para extraer de un volumen grande de sustancia cantidades ínfimas de isótopo radiactivo. En los experimentos se utilizaban métodos químicos y físicos de separación y su historia ya cuenta con más de ochenta años. Pioneros en este campo fueron María y Pierre Curie. Como ya conoce el lector, ellos lograron extraer radio de los desechos del mineral de uranio: una décima de gramo a partir de varias toneladas de roca. También fueron los primeros en introducir en la práctica el control radiométrico el cual permite comprobar hasta qué punto es buena la calidad y plena la medida con que se realiza esta extracción. Los investigadores aprovecharon la circunstancia de que con el aumento de la concentración del radio en los preparados crecía la radiactividad. Como detector se utilizaba un electrómetro cargado: cuanto mayor era la corriente de descarga, tanto más intensa resultaba ser la ionización del aire y, por consiguiente, tanta mayor cantidad de radio contenía la muestra.

Cuando se habla de Pierre y María Curie no se puede dejar de destacar que su trabajo que duró cuatro años para siempre quedará en la historia de la física como ejemplo de una labor desinteresada y abnegada. Los científicos se vieron ante la necesidad de superar dificultades vinculadas no sólo con la elaboración de los métodos de extracción de un elemento desconocido hasta entonces, el cual, además, se encontraba en el material inicial en cantidades tan ínfimas, sino también con ausencia de los recursos materiales necesarios, de un local adecuado y de asistentes. Resulta que en un país europeo ilustrado nadie estaba interesado en estos experimentos, y todos los gastos corrían a cargo del matrimonio Curie que los pagaban de sus exiguos ahorros. A las peticiones de poner a su disposición un laboratorio cualquiera se les contestaba negativamente, y el trabajo se llevaba a cabo en un viejo y medio desmoronado cobertizo. María Curie escribió en sus memorias: "Era una barraca construida de tablas con el suelo asfaltado y el techo de vidrio que casi no protegía contra la lluvia y sin ningunos dispositivos; sólo contenía viejas mesas de madera, una estufa de hierro fundido cuyo calor no era suficiente y un encerrado que con tanto gusto utilizaba Pierre Curie". A veces, desde

la mañana hasta altas horas de la tarde María Curie (que asumió el cumplimiento de las más difíciles operaciones de extracción) elaboraba la materia prima rodeada de humaredas de gases acres. De esta manera sometió a tratamiento ocho toneladas de pechblenda. Y hay que tener en cuenta que el matrimonio Curie gozaba de bastante fama entre los hombres de ciencia franceses.

No es de extrañar que en el libro dedicado a sus padres Eva Curie recordara con amargura las palabras: "A la República no le hacen falta científicos". Estas palabras fueron pronunciadas con cien años de anterioridad a los acontecimientos que describimos, acompañando la sentencia de muerte a Antonio Lavoisier, uno de los fundadores de la química contemporánea.

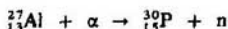
Ya en el primer año de su trabajo los Curie descubrieron que el mineral de uranio contiene dos nuevos elementos radiactivos: el polonio y el radio, y para 1902 ellos separaron el radio puro y determinaron seguidamente su peso atómico $A = 225$. De este modo se dio inicio a los métodos de extracción y separación de preparados radiactivos. Dichos métodos comenzaron a desarrollarse rápidamente.

El relevo lo tomaron Irene Curie (hija de María y Pierre Curie) y su esposo Federico Joliot (al cabo de varios años de trabajo conjunto comenzaron a firmar empleando el apellido común Joliot-Curie). Ya hemos hecho mención de la intervención de éstos en el VII Congreso de Solvay y del descubrimiento de la radiactividad artificial. Ahora abordemos estas cuestiones más detalladamente.

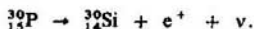
Los esposos Joliot realizaban experimentos con el polonio. Querían investigar su radiación beta y con el fin de absorber las partículas α que les molestaban colocaron entre la fuente y el detector una hoja de aluminio. Éste absorbió por completo las partículas alfa, pero ahora el detector empezó a registrar no sólo electrones, sino también positrones que el polonio no emitía.

En el Congreso de Solvay se hizo un informe al respecto. En las investigaciones sucesivas se puso de manifiesto que si se retira la fuente de polonio, la hoja, durante cierto tiempo, sigue emitiendo positrones. Fue entonces que los esposos Joliot-Curie llegaron a una conclusión audaz: las partículas α que bombardean los núcleos expulsan de éstos a los neutrones, mientras que ellas mismas se absorben. Como resultado se forma un nuevo isótopo radiactivo, el fósforo-30. Éste, seguidamente, se desintegra irradiando positrones. Esta reacción tiene el siguiente aspecto:

primero,



y, después,



Después de ello por primera vez fueron pronunciadas las palabras "radiactividad artificial". Pero una cosa es formar una idea correcta y es otra cosa, completamente distinta, prestar demostraciones convincentes de la certeza de esta idea. Y los físicos, para un tiempo, se convirtieron en químicos teniendo por objeto separar del aluminio el fósforo formado y, con ello, obtener las pruebas necesarias. Era tanto más difícil hacerlo, por cuanto isótopo radiactivo se desintegraba con una vida media cerca de tres minutos, y su extracción debía llevarse a cabo con bastante rapidez. Además, era prácticamente imposible separar varios átomos radiactivos. Sin embargo, se podía primero añadir a éstos una cantidad ponderable de fósforo no activo que poseía exactamente las mismas propiedades químicas y luego efectuar la extracción. El fósforo-30 acompañará por doquier a sus "hermanos" estables, los átomos del fósforo-31, los cuales, más tarde, recibieron el nombre de "portadores". Cuando esta metodología fue realizada y se consiguió que todas las operaciones se llevasen a cabo en un lapso de cerca de tres minutos, entonces se pudo celebrar la victoria. El detector indicaba de modo unívoco la actividad positrónica del fósforo separado.

El descubrimiento de Joliot-Curie parece como si abriera de par en par las puertas ante los investigadores. Aumentaba con rapidez el número de elementos radiactivos artificiales obtenidos por irradiación con partículas α y neutrones. En la conferencia leída con motivo de la recepción del Premio Nobel Federico Joliot-Curie se refirió al incremento del número de estos elementos cuyo comienzo se debe a María y Pierre Curie.

Ulteriormente, los métodos de la radioquímica llegaron a ser muy variados. He aquí, por ejemplo, uno de éstos. El blanco se sometía a irradiación con neutrones, parte de sus núcleos los captaba y se transformaba en un isótopo más pesado con el mismo número de protones y la misma estructura de la envoltura electrónica. Al parecer, la identidad de las propiedades químicas de los núcleos precursores e hijos, no permite separarlos. Sin embargo, dos científicos, Szilard y Chalmers, prestaron atención al hecho de que si se irradia, digamos, una solución de permanganato potásico, el manganeso-55, después de captar un neutrón, se transforma en manganeso-56, irradia cuantos gamma y, como resultado del retroceso, escapa de la molécula. Ahora, si la solución se filtra, los átomos radiactivos del manganeso-56 quedarán en el filtro. Únicamente, al principio, es necesario añadir a la solución un poco de portador insoluble con tal de que, en adelante,

tener que ver con cantidades tangibles de sustancia. Empleando este método se logró extraer tanto el cloro-38, como el bromo-80, etc.

Grandes dificultades surgieron al extraer plutonio del uranio irradiado con neutrones. El plutonio era necesario para resolver el problema atómico, sobre el cual en la Unión Soviética trabajaban muchos científicos encabezados por Igor Vasilievich Kurchatov. Pero este es un tema para un libro aparte. Y nosotros tenemos que volver al neutrino y relatar cómo se aprovecha la radioquímica en los experimentos con esta partícula.

2.2. EXPERIMENTOS DE DAVIS

Examinemos la desintegración beta de uno de los nucleones (reacciones (29) y (30)):

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu},$$

$$p \rightarrow n + e^+ + \nu.$$

En el primer caso el núcleo emite un electrón, y en el segundo, su antipartícula: el positrón. Surge una pregunta natural: ¿acaso son idénticos los neutrinos ν y $\bar{\nu}$ que participan en estos procesos? Hablando en general, el neutrino debe tener su antipartícula, pero la naturaleza era capaz de arreglárselas de tal manera que ν y $\bar{\nu}$ coincidiesen idénticamente. Semejante hecho tiene lugar, por ejemplo, para el mesón π^0 o el cuanto gamma. La segunda pregunta está relacionada con lo siguiente: ¿cuáles son, precisamente, los rasgos que distinguen el neutrino del antineutrino? Los mismos, obligatoriamente, deben determinarse por las particularidades de la interacción débil por cuanto el neutrino no tiene carga, ni tampoco momento magnético.

Tan sólo los experimentos podían dar respuesta a estas preguntas.

Analicemos ahora las reacciones inversas a aquellas que acabamos de mencionar:

$$\nu + n \rightarrow p + e^-,$$

$$\bar{\nu} + p \rightarrow n + e^+.$$

(34)

La segunda de estas reacciones ya nos es conocida (véase (32)). Es el proceso que observaron Reines y Cowan en el flujo de procedentes del reactor nuclear. Si en este flujo transcurre también la primera reacción (34), se podrá sacar la conclusión sobre la identidad de ν y $\bar{\nu}$. Y viceversa, si esta reacción no se observase, este hecho permitiría afirmar que ν y $\bar{\nu}$ son partículas diferentes. En la naturaleza no existen blancos de neutrones libres. Sólo se puede tratar de observar el

proceso (34) en los neutrones ligados en núcleos atómicos. En el caso de que $\nu \equiv \bar{\nu}$, el núcleo con Z protones y N neutrones debe transformarse en un núcleo nuevo en el cual el número de neutrones será en una unidad menor, y el de protones, en una unidad mayor. Durante esta transmutación escapa un solo electrón, y registrar dicho proceso empleando, digamos, el método de centelleo es un problema del mismo orden de complejidad que la detección de la dispersión del neutrino en el electrón. Sin embargo, en esta ocasión ayudó la original idea expuesta en 1946 por B. Pontecorvo. El científico propuso utilizar como blanco un líquido que contenía cloro. Por la acción del neutrino del reactor el átomo de cloro-37 (téngase presente otra vez, si $\nu \equiv \bar{\nu}$) debe transformarse en átomo de argón-37:



El argón formado es radiactivo. Teniendo el tiempo de vida de cerca de 30 días, éste se desintegra, es decir, experimenta la captura electrónica. Ésta es, precisamente, la reacción directa:



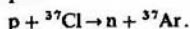
El lector advierte que las ecuaciones (35) y (36) son inversas en el caso de que el neutrino y el antineutrino sean idénticos.

El argón es un gas inerte. No reacciona con la sustancia del blanco, por lo tanto, se puede intentar extraerlo, introducirlo en el detector y registrarlo.

Los experimentos fueron llevados a cabo por R. Davis y sus colaboradores. Éstos duraron varios años, realizándose primero en el reactor de Brookhaven (1955) y, después, en el de Savannah-River (1956-1959). Ambos reactores se encuentran en los EE.UU. En el curso de este tiempo iba perfeccionándose paulatinamente la metodología de extracción a partir del blanco y la del registro de los átomos de argón-37, en tanto que el propio blanco adquiría un volumen cada vez mayor.

Sin embargo, el esquema del experimento permanecía invariable y consistía en lo siguiente. Un recipiente que contenía cerca de 11 m^3 de percloruro de etileno (C_2Cl_4), líquido utilizado para la limpieza química de la vestimenta, se ubicaba bajo la tierra, no lejos de un reactor en funcionamiento. Previamente, se introducía en éste cerca de 1 cm^3 de argón ordinario. El gas servía de portador para los átomos radiactivos que se formaban.

Durante uno, a veces, dos meses, el líquido se dejaba permanecer allí para acumular radiactividad, luego comenzaba el procedimiento de extracción. En el curso de varias horas a través del volumen del recipiente se hacía pasar helio. Este último, en forma de pequeñas burbujas atravesaba el líquido y "lavaba" del mismo los átomos de argón. Seguidamente, el helio pasaba a unas trampas especiales llenas de carbón activo y enfriadas hasta la temperatura de aire líquido. El argón se condensaba y era captado en la superficie del carbón, mientras que el helio pasaba libremente a través de la trampa. Realizados varios ciclos de este proceso, la trampa se separaba del sistema, se unía al detector y se calentaba. El carbón desprendía el argón captado y éste entraba en un contador diminuto (del que hablaremos más detalladamente en el siguiente capítulo). La actividad registrada en estos experimentos es casi diez veces menor que la esperada en el caso de que $\nu \equiv \bar{\nu}$. Este valor de la actividad se debía a los procesos de fondo cuya fuente principal eran las partículas cósmicas rápidas incidentes en el blanco y que daban lugar a la formación del argón-37 como resultado de las reacciones nucleares, por ejemplo:



De este modo, el resultado negativo de los experimentos de Davis demostró que ν y $\bar{\nu}$ son de naturaleza distinta, una conclusión de suma importancia para la física del neutrino. Un caso de este tipo, cuando la confirmación de una teoría ($\nu \neq \bar{\nu}$) y la refutación de otra ($\nu \equiv \bar{\nu}$) están relacionadas con la falta de observación de cierto proceso no es, ni mucho menos, frecuente. Y puesto que mencionamos los experimentos con resultado negativo, el autor se permitirá detenerse un poco en este tema.

2.3. SOBRE EL EXPERIMENTO CON RESULTADO NEGATIVO

En cierta ocasión alguien colgó en el laboratorio una hoja de papel Whatman. Cada uno podía acercarse y escribir lo que le inquietaba. En lo fundamental, las inscripciones ponían de manifiesto el conocimiento por los colaboradores de las obras de escritores humoristas. Retazos de Hašek ("Usted me conocía por mi lado bueno, ¡ahora me conocerá por mi lado malo!") y de Mark Twain se alternaban con frases graciosas sacadas de los periódicos o, meramente, con las que contenían errores de imprenta. Con la nueva instalación del laboratorio trabajaba, principalmente, gente joven, de modo que este "periódico mural" *sui generis* se llenaba con rapidez de materiales. Pero pronto dejaron de estar para risas. Transcurrían

semanas; primero, unos fallos enigmáticos sustituían a otros no menos enigmáticos, después, la instalación comenzó por fin a funcionar, pero el efecto que todos esperaban, a pesar de todo, no se observaba. Precisamente por este período en el mural apareció el bastante conocido aforismo: "Es difícil captar un gato negro en una estancia oscura. Especialmente, si el gato en ella no está". Era muy tarde, ya no teníamos fuerzas para trabajar, ni optimismo para seguir con los chistes, y comenzamos a recordar los experimentos en los cuales hemos buscado algo, sin encontrarlo, es decir, los experimentos con resultados negativos. Claro está, no se trataba de los experimentos en su variante más simple y triste, relacionada con errores o con una falta sistemática de suerte. Ni tampoco del factor que no depende del experimentador en absoluto: el cierre inesperado del tema.

Se trataba de que el resultado negativo de un experimento indica con frecuencia que su precisión todavía no es suficiente o que la búsqueda no se efectúa en el campo adecuado, o bien, que unas causas extrínsecas enmascaran el fenómeno. En semejantes casos este experimento no es sino un peldaño que se debe superar para proseguir las investigaciones armándose de paciencia y de nueva metodología, o bien, instalar en uno de los numerosos senderos de la ciencia el signo: "Prohibido el paso". Seguidamente, se inició a enumerar los casos en que las búsquedas carentes de éxito prepararon grandes descubrimientos. Fue entonces cuando yo, por primera vez, me enteré de la historia del descubrimiento del neutrón.

El 3 de junio de 1920 Rutherford intervino con una conferencia en la Sociedad Científica Real, y esta conferencia entró en la historia de la física, pues en ella el científico predijo la existencia de neutrones en el núcleo, y en la naturaleza, de isótopos pesados de hidrógeno, deuterio y tritio, así como del isótopo ligero de helio. Como el lector ya sabe, hasta el descubrimiento experimental del neutrón aún quedaba un total de 12 años. Y durante todos estos años el discípulo de Rutherford, J. Chadwick, al igual que otros empleados del laboratorio, estuvo buscando los caminos para detectar la partícula neutra que entra en la composición del núcleo. Obtenía resultados negativos, pero su fe en el carácter certero del cuadro de la estructura de la sustancia, dibujado por su maestro, no se debilitaba. Y no fue en vano. Chadwick, en su fuero interno, estaba preparado para descubrir el neutrón y lo descubrió, mientras que los primeros científicos que observaron los neutrones — los físicos alemanes Bothe y Becker y los franceses Irene y Federico Joliot-Curie — no lo estaban y no comprendieron la naturaleza de esta radiación. Los propios esposos Joliot-Curie escribieron más tarde sobre el particular: "La mayoría de

los físicos, incluyéndonos también a nosotros, no prestaron atención a la hipótesis de Rutherford. Pero la misma seguía flotando bajo las bóvedas del edificio del laboratorio de Cavendish donde trabajaba Chadwick, y era completamente natural y justo que fuera aquí donde se pusiera el punto final al descubrimiento del neutrino. Las ideas expuestas alguna vez por nuestros maestros—tanto por los vivos, como por aquellos que nos han abandonado—numerosas veces se evocan a la memoria y se olvidan en sus laboratorios, penetrando consciente o inconscientemente en las mentes de quienes siempre están presentes allí. Poco a poco estas ideas maduran y, entonces, se realiza el descubrimiento”.

El resultado negativo es importante cuando permite limitar cierta magnitud física. Pueden servir de ejemplo los numerosos experimentos en que se buscaba la masa del neutrino, obteniéndose por ésta restricciones cada vez más exactas.

Finalmente, nos hemos acordado de los experimentos cuyo resultado negativo forma la base de la imagen moderna del mundo. Varias personas al unísono pronunciaron el nombre de Alberto Michelson, el primero de los científicos norteamericanos laureado con el Premio Nobel. Un experimentador que dedicó su vida a un solo ensayo.

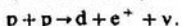
A los veintiséis años se hizo célebre: el alférez de fragata A. Michelson midió con gran exactitud la velocidad de la luz. Luego, dedicó muchos años el científico a elaborar nuevos instrumentos y precisar los resultados de sus mediciones. Su idea era confirmar la teoría del éter omnipenetrante e inmóvil y determinar la velocidad del “viento de éter” que sopla en la Tierra durante su movimiento por la órbita. Y no descubría tal viento. La velocidad de la luz no dependía del movimiento de la Tierra. A la teoría del éter le fue asestado un pesado golpe. Después de uno de los experimentos el autor, como justificándose, escribió que el efecto no se había observado lo que, por supuesto, no tenía nada de bueno, pero, el experimento no era inútil, por la mera razón de que en el curso del trabajo se había inventado un nuevo e interesante instrumento: el interferómetro. Pasaron 18 años. Alberto Einstein formuló la teoría especial de la relatividad uno de cuyos axiomas decía: la velocidad de la luz no depende del sistema de referencia. Al hablar de los experimentos de Michelson, Einstein los llamó “experimentos que desbrozaron el camino para la teoría de la relatividad”.

Especialmente mucho se habló aquella tarde acerca de los recién comenzados intentos del grupo de Davis de registrar los neutrinos solares. En los primeros experimentos éstos no fueron detectados, hecho que dio inicio a una gran cantidad de diferentes conjeturas e, incluso, teorías.

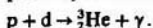
2.4. BÚSQUEDA DE LOS NEUTRINOS SOLARES

A enormes temperaturas (de decenas de millones de grados) y presiones colosales, en lo más profundo de las estrellas se desarrollan reacciones termonucleares. Son reacciones de combinación, de síntesis, cuando el hidrógeno "se quema" y se forma helio y elementos más pesados. He aquí el ejemplo de uno de los ciclos de estas reacciones:

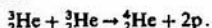
1. Dos protones se transforman en núcleo del isótopo pesado de hidrógeno, el deuterón (o deutón):



2. El protón y el deutón forman el núcleo del átomo de helio-3:



3. Dos núcleos del helio-3 fusionan, transformándose en helio-4 y protones:



Es evidente que el resultado final será la transformación de cuatro protones en un núcleo de helio-4: la partícula α bien conocida por nosotros. En esta partícula los nucleones vienen empaquetados muy densamente y poseen una considerable energía de enlace. Debido a ello en este ciclo se libera energía: la parte principal en forma de calor (cerca de 20 MeV) y una parte mínima se arrastra por el neutrino. Precisamente estas reacciones—así lo consideran los físicos y los astrofísicos—representan el manantial de la energía estelar. En efecto, el desprendimiento de energía en los procesos termonucleares es inmenso. A título de ejemplo podemos calcular el calor que se desprende durante la síntesis del helio a partir de 1 g de hidrógeno. Su cantidad será suficiente para hacer hervir un pequeño lago.

Dilucidar detalladamente los procesos estelares es un problema de gran interés e importancia.

Claro está que las miradas de los científicos se dirigen, en primer término, a la estrella más cercana, el Sol. Es de fácil observación, y los datos referentes a la capa superficial de nuestro Astro se han obtenido y comprobado reiteradas veces, pero, ¿qué es lo que ocurre en su interior? Solamente por vía indirecta se pueden obtener datos sobre las reacciones termonucleares que transcurren allí, ya que cualquier radiación se absorbe por la enorme masa de sustancia estelar. A excepción de la radiación neutrínica. Estas partículas atraviesan todos los obstáculos con la misma facilidad con que la luz visible penetra a través del vidrio limpio de las ventanas. Los neutrinos llevan información acerca de los procesos intraestelares y pueden registrarse

en la Tierra. Mas aunque nos hemos acostumbrado a que el valor del efecto en los experimentos con los neutrinos es muy pequeño, en el caso de los neutrinos solares esta insignificancia suya bate todos los récords anteriores.

Esto no depende tanto de la intensidad del flujo de neutrinos solares que incide sobre la Tierra (a cada centímetro cuadrado de superficie del planeta corresponde, aproximadamente, de 50 a 80 mil millones de neutrinos por segundo), como del hecho de que el espectro de energía de estos neutrinos es muy blando. Y cuanto más blando es el espectro, tanto menor es la probabilidad de la interacción de ν con la sustancia. Además, para una reacción que tiene umbral de energía, sólo puede resultar adecuada una parte ínfima del flujo total de neutrinos. Si se aprovecha la idea propuesta por B. Pontecorvo (pues el Sol irradia precisamente ν y no $\bar{\nu}$, igual que el reactor, y los primeros deben provocar la transformación del cloro-37 en argón-37) resultará que en una tonelada de sustancia durante dos años ¡deben formarse 1 ó 2 átomos de argón!

Pero sea como fuera, el grupo de experimentadores con R. Davis a la cabeza emprendió la búsqueda de los neutrinos solares. Sus experimentos, iniciados hace unos quince años, no se interrumpen hasta la fecha, y de año en año aumenta la estadística de las partículas registradas. Para poner semejante experimento era necesario, ante todo, librarse del fondo de radiaciones extrínsecas. Aquí sólo convenía aplicar el método de la "fuerza bruta", o sea, internarse al máximo posible bajo la tierra, escapando de la radiación cósmica. Por esta razón la instalación se ubica en una mina donde antes se extraía oro, a la profundidad de cerca de un kilómetro y medio bajo la superficie.

Es una enorme cisterna horizontal cuya cabida es de $3,8 \cdot 10^5$ litros de líquido (C_2Cl_4) rodeada de una capa gruesa de agua que disminuye el flujo de las partículas de fondo procedentes de las paredes de la mina. El sistema de extracción del argón a partir de helio y de la eliminación de impurezas extrañas ocupa una sala subterránea aparte.

Los resultados de las primeras mediciones podían llamarse, sin exagerar, desalentadores: el nivel de actividad presagiado por los astrofísicos superaba decenas de veces aquél que se observaba en el experimento. ¿A dónde, al fin y al cabo, se metieron los neutrinos? Primeramente, comenzó el alboroto en las conferencias físicas, y en las revistas aumentó bruscamente el número de artículos dedicados a los neutrinos solares. A continuación, la batahola se transmitió a ediciones de divulgación e, incluso, a los periódicos de la tarde. Se puso muy de moda escribir y, aún más, dar conferencias sobre el tema de "¿Transcurren en el Sol reacciones termonucleares o éste se ha extinguido ya?".

Pero con el correr del tiempo los físicos dedicados al estudio del neutrino realizaban nuevos cálculos, promovían hipótesis interesantes, y el grupo de Davis proseguía sus experimentos. Se puso de manifiesto que los pronósticos teóricos eran excesivamente altos. Al mismo tiempo, la exactitud estadística de los primeros experimentos era aún muy pequeña. Poco a poco, el valor experimental medio fue aumentando. En la actualidad, la situación no tiene un aspecto tan dramático, aunque está lejos de conseguirse la plena concordancia de la teoría y el experimento.

También los físicos soviéticos trabajan sobre la creación del servicio neutrínico del Sol. Los encabezan G. T. Zatsepin, A. E. Chudakov y A. A. Pomanski. En 1977, en el norte del Cáucaso se celebró la Conferencia Internacional para la Física del Neutrino (Neutrino-77). Uno de los días los participantes en esta conferencia fueron invitados a visitar la primera etapa del observatorio neutrínico que acababa de inaugurarse.

En la profundidad del desfiladero de Baksan se interna en la roca un túnel. Su longitud total debe constituir cerca de 4 km. A lo largo del túnel están situadas salas experimentales —enormes cuevas artificiales y locales de menores dimensiones— que hacen las veces de cámaras de fondo reducido. En 1977 comenzaron las mediciones en la primera sala donde fue instalado un telescopio de centelleo capaz de registrar partículas cósmicas rápidas. Los detectores de neutrinos solares se emplazarán en la segunda sala que se encuentra en el extremo del túnel a la profundidad de cerca de dos kilómetros bajo la cumbre de la montaña. La ingente capa de sustancia debilita millones de veces el flujo de mesones cósmicos en comparación con el mismo en la superficie de la Tierra. Se supone que en la sala trabajarán simultáneamente varios detectores de neutrinos de diferentes tipos lo que permitirá investigar el espectro de los neutrinos solares dentro de unos límites más amplios que en los experimentos de Davis. Por consiguiente, se ofrecerá la posibilidad de obtener más información sobre los procesos operados en las profundidades de las estrellas.

2.5. EL NEUTRINO POLARIZADO

El estudio de la interacción débil comenzó por la búsqueda de la energía, el impulso y el momento de impulso que faltaban en la desintegración beta. Ya hemos mencionado las palabras proféticas de Niels Bohr: "Cabe esperar de la desintegración β nuevas sorpresas".

Sin embargo, es poco probable que el científico se hubiera imaginado el entusiasmo con que la interacción débil comenzaría a cumplir esta predicción. Volviendo a páginas anteriores, queremos

recordar al lector que las leyes de la conservación están relacionadas con la simetría existente en la naturaleza. Al parecer, los físicos ya agotaron todas las posibles transformaciones y transferencias en el espacio, así como los giros, pero después de creada la mecánica cuántica llegó a examinarse una más: la reflexión. ¿Se desarrollarán de la misma manera que antes los procesos físicos si éstos se trasladan al mundo especular, reflejado? En mucho tiempo nadie puso en tela de juicio la respuesta positiva. Durante la reflexión los lados derecho e izquierdo cambian de lugar y, analizando fenómenos conocidos, los científicos se cercioraban cada vez de que lo diestro es indistinguible de lo siniestro, como nuestro mundo no se distingue del especular.

He aquí un ejemplo muy sencillo: la carga positiva se mueve en dirección del campo eléctrico E . Reflejémoslo en el espejo. El campo E se transformará en $-E$, también cambiará su signo la velocidad de la carga y otra vez resultará que la carga se mueve por el campo. De la invariabilidad del comportamiento de las leyes físicas durante la reflexión se derivaba una ley importante para la mecánica cuántica, la ley de la conservación de la paridad espacial. No obstante, las cosas no resultaron tan evidentes como parecían. Lo descubrieron en 1956 los físicos norteamericanos, chinos de nacimiento, Lee Tsungdao y Yang Chungtao. Éstos trataron de explicar un fenómeno incomprensible que surgía durante la desintegración de los mesones K y analizaron los datos experimentales referentes a la simetría especular. Se puso de manifiesto que existen pruebas convincentes de ésta para las interacciones fuertes y electromagnéticas, mientras que para las débiles no había tales pruebas.

Lee y Yang se decidieron a promover una hipótesis completamente revolucionaria: la interacción débil infringe la ley de la conservación de la paridad. Su conducta es diferente en nuestro mundo y en el especular y permite distinguir lo diestro de lo siniestro. Este enfoque les permitió resolver de una vez el problema de los mesones K . Claro está que una hipótesis tan radical requería muchas comprobaciones experimentales. Y en todos los laboratorios del mundo comenzaron, con premura, a realizar experimentos para investigar la simetría de la interacción débil. Al cabo de un año apareció ya la seguridad de que las suposiciones de los teóricos eran ciertas. La

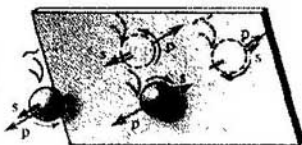


FIG. 16. Durante la reflexión en el espejo la velocidad cambia su signo y el espín no lo cambia. El neutrino se transforma en antineutrino. Se infringe la paridad espacial.

infracción de la simetría permitió a Landau, Salam, Lee y Yang enunciar, casi simultáneamente, la teoría, de acuerdo con la cual el espín del antineutrino siempre está dirigido según el impulso, y el del neutrino, en contra del impulso, tal como lo muestra la fig. 16. Si reflejamos una partícula de este tipo en el espejo, ésta se transformará en antipartícula. Esto se debe a que durante la reflexión el impulso cambia su signo, en tanto que la dirección del giro no lo hace. Anteriormente, la conservación de la paridad prohibía esto, ahora la restricción se ha suprimido. La nueva teoría suponía que la interacción débil se somete a una simetría más compleja. Para ésa, simultáneamente con la reflexión, todas las partículas deben sustituirse por las antipartículas, y sólo en este caso en la naturaleza nada cambiará. Y de nuevo, los experimentos confirmaron los vaticinios de los teóricos. ¡Por fin, la diferencia entre el neutrino y el antineutrino se hizo más tangible!

2.6. CONSERVACIÓN DE LA CARGA LEPTÓNICA

Las partículas ligeras que participan en la interacción débil — el electrón, neutrino, mesón μ y sus antipartículas — recibieron el nombre de *leptones*. Examinando las reacciones con la participación de éstas, los físicos llegaron a la conclusión de que se puede introducir una magnitud característica para estas partículas: la carga leptónica l . En la tabla se dan los valores de l para una serie de partículas.

Partícula	Carga leptónica l
e^-	+1
e^+	-1
ν	+1
$\bar{\nu}$	-1
μ^-	+1
μ^+	-1
Las demás partículas	0

Examinemos algunas reacciones:

$$\mu^- \rightarrow e^- + \nu + \bar{\nu}, \quad (37)$$

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu + \bar{\nu}, \quad (38)$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}, \quad (39)$$

$$K^0 \rightarrow \pi^- + e^+ + \nu. \quad (40)$$

En todas estas reacciones, al igual que en los procesos (29), (30), (32) y (34), la suma algebraica de las cargas l durante las transformaciones de las partículas queda invariable. Debido a ello, la lista de las leyes de conservación se completó con una más, *la ley de conservación de la carga leptónica*. Al cabo de cierto tiempo esta ley fue precisada y hecha más compleja, de lo cual hablaremos más adelante.

Capítulo 3

CONTADORES, CÁMARAS Y SORPRESAS DE LA INTERACCIÓN DÉBIL

3.1. DESCARGA DE GAS

Con cuánta frecuencia los fenómenos que tienen la misma naturaleza se diferencian uno del otro de la forma más sorprendente.

A los marineros de la flota de vela les sumergían en un pasmo supersticioso los fuegos que aparecían súbitamente durante las tormentas y huracanes en los mástiles y obenques. Tenían el aspecto de antorchas o esferas centelleantes, ardiendo con una llama azulenta chasqueante. Por el nombre de una iglesia en Italia, en cuya aguja, durante la intemperie, se encendía a menudo una antorcha semejante, el misterioso fenómeno recibió el nombre de fuegos de San Telmo. Se creía que el barco en que se encendían estos fuegos no naufragaría durante la tempestad.

Un asombro no menor despertaba entre los viajeros la aurora boreal. Muchos científicos intentaban de resolver su enigma, entre ellos también M. V. Lomonósov, quien suponía, con plena razón, que su causa reside en la "fuerza eléctrica". ¡Y los zigzagues del relámpago en el cielo nocturno! ¡Cuánto trabajo costó investigarlo! Y todos estos fenómenos, y otros muchos, muchísimos, por ejemplo, las lamparillas parpadeantes en el tablero de una máquina computadora no son sino las multifacéticas manifestaciones de la descarga eléctrica en los gases. Hace más de setenta años este fenómeno comenzó a utilizarse en los instrumentos que registran las partículas elementales.

En el laboratorio de Cavendish durante muchos años se realizaron trabajos para el estudio de la descarga en los gases. También aquí, bajo la dirección de Rutherford, en 1908, fue construido el primer contador de gas. Éste no parecía muy complicado: un trozo de tubo metálico cerrado por los dos extremos con tapones hechos de material aislante. Por su eje el tubo tenía estirado un alambre (hilo) cuyos extremos salían a través de los tapones. El aire se extraía del contador hasta la presión de 10 a 30 mm de Hg, y entre el alambre y las paredes del tubo se aplicaba una alta tensión de cerca de 1000 V. A través de una fina ventanilla especial en el contador irrumpían partículas alfa (con frecuencia, el manantial de éstas también se disponía en el interior), ionizando el aire, de modo que surgía la descarga de gas, y el impulso de la corriente que pasaba a través del contador podía

registrarse. Rutherford y Geiger empleaban este instrumento en sus experimentos y éste les permitía registrar con seguridad centenares de impulsos por segundo. ¡Ni comparar se podía con el recuento de los centelleos y la permanencia durante muchas horas en una habitación oscura! El detector de descarga de gas cobró una rápida popularidad; en el curso de una serie de años se iba perfeccionando, cambiando la configuración de los electrodos, buscando los regímenes de trabajo más adecuados y los gases para el relleno de los contadores, etc., etc. Hasta la fecha se ha creado una multitud de tipos de estos detectores. Éstos compiten exitosamente con otros contadores de partículas elementales y son de amplio uso en la física nuclear, en la química, geología, medicina y en la técnica.

3.2. TIPOS DE CONTADORES DE DESCARGA DE GAS

En los distintos contadores se utilizan diferentes tipos de descarga de gas, y es conveniente, aunque sea de una forma muy sucinta, conocer la física de este fenómeno. La fig. 17 representa un contador de gas en dos proyecciones (una vista lateral y otra frontal). Entre su hilo, que sirve de electrodo positivo, el ánodo, y las paredes del tubo (cátodo) una batería crea la diferencia de potencial u . El campo en el interior del contador tiene el aspecto mostrado en la fig. 17 a la derecha. Éste es no homogéneo, con la particularidad de que su intensidad en el ánodo es mayor que en el cátodo. A ello corresponde una mayor densidad de las líneas de fuerza junto al hilo. Analicemos ahora el trabajo de este detector de partículas en el caso de que el valor de u incremente paulatinamente. Sea que la partícula cargada va a parar al gas cuando la tensión u es igual a cero. Entonces, los pares de iones y electrones formados se neutralizan al cabo de un lapso pequeño de tiempo, o sea, se produce la recombinación y en la resistencia R no se origina el impulso de corriente. Si hacemos

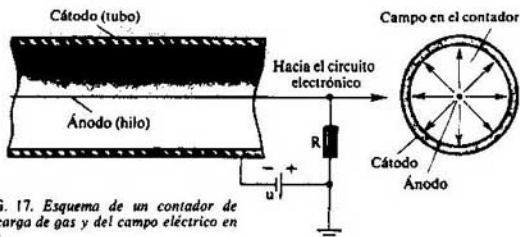


FIG. 17. Esquema de un contador de descarga de gas y del campo eléctrico en éste.

aumentar u (fig. 18) obligamos a los iones a moverse en dirección del campo, hacia el cátodo, y los electrones, en contra del campo, hacia el ánodo. La velocidad con la cual éstos se mueven, dirigidamente, hacia el electrodo se denomina *velocidad de deriva*. Por cuanto los iones son miles de veces más pesados, su velocidad de deriva es muchas veces menor. La tensión aplicada no permitirá recombinarse a todos los pares, y por la resistencia R fluirá la corriente que aumenta con el crecimiento de u desde cero hasta u_1 . En el tramo donde la tensión varía desde u_1 hasta u_2 todos los iones formados en la huella de la partícula llegan a los electrodos, y la carga completa que pasa por la resistencia R constituye $Q = eN$, donde N es el número de pares de iones. La corriente ya no depende de la tensión (la llamada corriente de saturación). Un detector de gas que trabaja en este régimen lleva el nombre de *cámara de ionización*.

La más simple entre las cámaras de ionización conocidas es el electroscopio. Cuando éste se somete a irradiación, el aire dentro del electroscopio se ioniza convirtiéndose en conductor. Las laminillas se juntan. En el capítulo anterior ya se ha descrito que los esposos Curie, valiéndose de este instrumento, determinaban la intensidad de radiación de los preparados de radio. El electrómetro se utilizaba en la geología en la prospección de minerales radiactivos mientras no lo desplazaron detectores más perfectos.

Con frecuencia se emplean cámaras de ionización con electrodos paralelos planos, tales que el campo eléctrico sea homogéneo. Por medio de estas cámaras es cómodo registrar la energía de las partículas cuya longitud de recorrido cabe por completo dentro del volumen sensible, por ejemplo, de los fragmentos de la fisión de núcleos pesados (el recorrido en el aire es de 2,5 cm a presión normal).

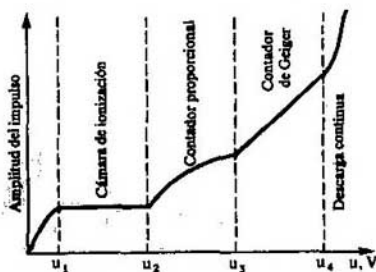


FIG. 18. Diferentes tipos de descarga de gas.

Representa algunas dificultades el hecho de que el impulso de la corriente procedente de la cámara de ionización es sumamente pequeño. Por ejemplo, si, digamos, el recorrido de la partícula α con una energía de 3,5 MeV cupo dentro de la cámara, allí se engendrarán 10^5 pares de iones cuya carga total constituye nada más que 10^{-14} culombios (véase la pág. 41). Para registrar esta cantidad de electricidad deben emplearse amplificadores electrónicos especiales. En los primeros años, cuando los detectores de ionización estaban creándose, semejantes instrumentos todavía no existían, y los físicos utilizaban para alimentar los contadores una tensión más alta y, por consiguiente, otros regímenes de descarga de gas.

Por esta razón pasemos a la descripción de los procesos que se producen en el gas al variar la tensión en el contador en los límites de u_2 a u_3 (véase la fig. 18).

Esta lleva el nombre de región proporcional, y los detectores que trabajan en este régimen se denominan *contadores proporcionales*. Ahora el campo en las proximidades del hilo resulta suficiente para que los electrones entre dos colisiones tengan tiempo de acelerarse hasta la energía E igual o mayor que el potencial de ionización. Con cierta probabilidad el electrón que embiste ioniza el átomo, arranca un electrón secundario, este último se acelera, etc. El proceso se acrecienta en forma de avalancha, hasta que los electrones se acumulen en el hilo. La carga total que pasa a través de la resistencia es $Q = KeN$, donde K es el factor de amplificación en un medio gaseoso. Dicho factor puede variar desde unidades hasta decenas de miles, en dependencia del régimen de trabajo. Lo importante es que Q siga siendo proporcional a E y lleve información sobre la energía dejada por la partícula en el detector *).

El primer contador de Rutherford y Geiger trabajó en el régimen proporcional. Registraba tan sólo la radiación alfa, por cuanto la capacidad de ionización de las partículas beta es mucho menor y, como ya hemos señalado, los amplificadores electrónicos aparecieron mucho más tarde.

En la actualidad, los contadores proporcionales se aplican ampliamente para registrar la radiación blanda de rayos X y la radiación β . Algunos tipos especiales de estos contadores llenos de gases BF_3 o helio-3 utilizan para registrar los neutrones lentos. Los

* Durante el choque con los electrones tiene lugar, además, el proceso de excitación de las moléculas del gas. Los fotones emitidos pueden arrancar del cátodo electrones, y éstos, a su vez, originar un segundo impulso en el contador. Sin embargo, para $K < 1000$ la probabilidad de aparición de estos procesos secundarios es pequeña y casi no deforman los impulsos.

neutrones se captan por los núcleos de boro-10:



o los de helio-3:



En el primer caso las partículas alfa y el núcleo de litio arrastran una energía de 2,7 MeV, en el segundo, los productos de reacción tienen una energía total de $\approx 0,8$ MeV. Puesto que los recorridos de las partículas cargadas que se han formado son muy pequeños y, las más de las veces, caben por completo dentro del volumen sensible del contador, el espectro de energía de los acontecimientos originados por la captura de los neutrones tiene el aspecto de un pico estrecho. Dicha circunstancia permite distinguir fácilmente los acontecimientos neutrónicos de cualesquiera otros y registrar estas partículas por medio de contadores al boro o al helio en las condiciones de fondo gamma considerable.

Dejemos a un lado ahora la región de tensiones que lleva el nombre de región de proporcionalidad limitada y recurramos a las magnitudes $u > u_3$. En este régimen la amplitud del impulso ya no depende del número inicial de iones. Esto se debe a las siguientes causas. Al aumentar la tensión en el contador crece también considerablemente el número de fotones que inciden sobre el cátodo y arrancan de éste fotoelectrones. Estos, dirigiéndose al ánodo-hilo, provocan otra vez la avalancha, irradian otra vez fotones, etc. Si bien en el contador proporcional los procesos secundarios revestían un carácter de amortiguación, ahora la descarga se mantiene a sí misma y se denomina *descarga automantenida* o *descarga autónoma*. El contador "olvida" la ionización primaria. Surge una pregunta lícita: ¿de qué modo esta descarga cesa y el detector vuelve a estar listo para el trabajo? Resulta que todo reside en la pequeña velocidad de desplazamiento de los iones positivos. Mientras se acrecientan las avalanchas de electrones y fotones, a aquéllas les falta tiempo para alejarse mucho del hilo del contador, y a medida que la descarga se desarrolla forman en torno a éste una especie de "funda" de carga positiva. La intensidad del campo alrededor del hilo disminuye y la descarga se extingue. Sin embargo, puede volver a producirse cuando los iones positivos lleguen a las paredes del contador (cátodo), teniendo lugar su neutralización. Otra vez se engendrarán fotones capaces de provocar una avalancha. La descarga secundaria se previene ya sea por circuitos electrónicos especiales extintores, o bien, introduciendo en el contador, además del gas básico (por ejemplo, el argón), algún gas poliatómico (vapores de alcohol, de metano, etc.). El

papel del último consiste en absorber fotones y neutralizar, durante la colisión, los iones del gas básico. No nos detendremos en estos procesos, señalando tan sólo que estos contadores "autoextintores" han encontrado la más amplia aplicación.

En 1913 Geiger, por primera vez, hizo uso de un contador con una descarga automantenida, y en 1928, en el trabajo de Geiger y Müller, éste experimentó perfeccionamientos sustanciales. Esta es la causa de que los detectores que trabajan en este campo de descarga gaseosa se denominen con frecuencia contadores Geiger-Müller. En 1937, Troost, propuso añadir al gas básico del contador vapor de alcohol. La descarga gaseosa automantenida en el contador Geiger-Müller es una descarga en corona. Precisamente la aparición de ésta en forma de lenguas danzantes de fuego o de guirnaldas luminosas sobre las cuerdas húmedas de los barcos se atribuía en la Edad Media a la influencia de San Telmo.

3.3. CONTADOR PARA LOS NEUTRINOS SOLARES

Los contadores de gas se empleaban y siguen empleándose en los experimentos con los neutrinos. Con su ayuda se realizaban experimentos referentes al retroceso de los núcleos y se obtuvieron pruebas indirectas de la existencia de los neutrinos, se llevaban a cabo las mediciones de la masa de la partícula ν y, finalmente, ya en los últimos tiempos, los contadores proporcionales rellenos con helio-3 ayudaron a descubrir corrientes neutras, tema del que hablaremos al final de este libro.

Y, mientras tanto, cumpliendo nuestra promesa, retornemos a los experimentos con el neutrino solar. Así pues, los átomos radiactivos de argón-37, junto con el gas portador, llegaban al contador. ¿Cómo se puede registrarlos? Cuando el argón-37 se desintegra dando lugar a la formación del cloro-37 se operan procesos bastante complejos, pero lo que nos importa a nosotros es que como resultado de éstos escapa un electrón de energía muy pequeña (2,8 keV). El recorrido de este electrón en el gas a presión normal constituye unas décimas partes de milímetro. En correspondencia, puede construirse un contador de dimensiones pequeñas, y cuanto menor es el tamaño del contador, tanto menor es su fondo propio y tanto más fácil es protegerlo contra la radiactividad del medio ambiente. El fondo pequeño y la alta eficacia de registro son las condiciones necesarias para la utilización del detector en tales experimentos, ya que en toda la instalación un solo átomo de argón aparecía, por término medio, una vez en tres días.

Insertemos ahora la descripción de la construcción de uno de los contadores utilizados (el detector está perfeccionándose constantemente). Su volumen era menos de 1 cm^3 . El cátodo estaba hecho de hierro superpuro fundido por una tecnología especial, con el fin de reducir en la medida de lo posible el contenido de elementos con radiactividad natural. La envoltura exterior del contador — también de material superpuro — era de cuarzo fundido. Éste se encontraba rodeado de una capa de protección pasiva (en una serie de experimentos se empleaba acero), así como de mercurio. Esta instalación, enteramente, se encontraba dentro de un cristal muy grande de yoduro sódico que servía de protección activa. Finalmente, se utilizaba también la segunda capa de protección activa: un cerco de contadores de gas proporcionales que rodeaban el cristal.

Involuntariamente, llega a la memoria la exclamación de uno de los invitados extranjeros a la conferencia "Neutrino-77". Éste examinaba con placer la "matrioshka" (muñeca rusa de madera que contiene otras de menor tamaño), la armaba y desarmaba y, por fin, profirió con alegría: "¡Atino qué es esto! ¡Es un modelo simple de madera del detector de Davis!"

Los acontecimientos relacionados con la desintegración del argón-37 se seleccionaban ateniéndose a dos indicios: por la amplitud de los impulsos y por su forma. El primero es bastante comprensible. El contador es proporcional y, debido a ello, en el espectro de energía los impulsos de los electrones con una energía de $2,8\text{ keV}$ deben tener la forma de un pico unitario.

Mientras tanto, el fondo está distribuido por todo el diapasón energético de un modo más o menos uniforme. En lo que se refiere a la investigación de la forma del impulso, ésta proporcionó resultados muy interesantes. Supongamos que una partícula rápida del fondo, al pasar a través del contador, deja en éste la misma energía que los electrones procedentes de la desintegración del argón-37. Su traza puede representar una cadenita espaciada de iones, en tanto que el electrón forma todos estos iones casi en un punto. Al desplazarse en el campo eléctrico del contador hacia el hilo y engendrar avalanchas en su entorno, las cargas debidas a la partícula rápida crearán un impulso más prolongado en el tiempo, aunque la cantidad total de electricidad en ambos casos sea la misma. De este modo los impulsos serán diferentes por la forma del incremento en el tiempo. Y si éstos se investigan con aparatos especiales, es posible separar el efecto y el fondo.

Debido a todas las medidas tomadas y el trabajo de muchos años encaminado a perfeccionar el detector, el fondo del contador en los experimentos del grupo de Davis llegó a ser de $0,5$ recuentos en 35

días de medición! Y no olvide que en los primeros experimentos dedicados al estudio de la diferencia entre ν y $\bar{\nu}$ realizados en los años 1955-1956 éste constituía de 30 a 60 unidades diarias.

3.4. CÁMARA DE CHISPAS

Ya es hora de pasar de la descripción de uno de los detectores de ionización más pequeños a la de uno de los más grandes. Este se empleó en los experimentos con los neutrinos en aceleradores, y las dimensiones de un detector de este tipo se corresponden con estas gigantescas máquinas, con cuya ayuda los físicos penetran cada vez a mayor profundidad en la sustancia. Se trata de grandes cámaras de chispas. Y en cuanto a la descarga por chispas, de seguro, no hay persona que no la haya observado.

El rayo cayó sobre un árbol alto. Imaginémosnos que el tiempo se retarda y podemos ver el cuadro consecutivo del desarrollo de esta chispa gigante. Impulsados por la enorme diferencia de potencial los flujos de electrones se dirigieron de la nube a la superficie de la Tierra. A costa de la ionización por colisión, la emisión de fotones por los átomos excitados y la fotoionización del aire se engendraron las avalanchas de cargas. Estas emiten una luz débil y se abren camino como si fuera a tirones aislados que siguen uno tras otro a intervalos de 10^{-5} a 10^{-4} s. La trayectoria de estas avalanchas es una caprichosa línea quebrada. Por fin, las avalanchas exploradoras unieron la nube con la Tierra por medio de un cordón conductor, llamado "streamer", constituido de plasma: iones y electrones. Por este canal se dirige un potente flujo de cargas. ¡El relámpago! La longitud del "streamer" puede alcanzar 10 km y el diámetro, decenas de centímetros. Cada relámpago incluye varias fulguraciones de la descarga, la cual sigue el camino tendido por las avalanchas exploradoras. El número total de fulguraciones puede llegar a cincuenta.

El gas en el canal del "streamer" se calienta a una temperatura alta, se expande y el sonido producido por la onda de choque lo llamamos trueno. Este portentoso fenómeno de la naturaleza es análogo a la chispa que salta entre las láminas planas de la cámara por el camino de la partícula que pasó volando.

La diferencia consiste en que la alta tensión entre las paredes (electrodos) de la cámara existe poco tiempo. Esta tensión se suministra por un circuito electrónico especial durante un plazo breve después del paso de la partícula cargada. En este caso se aprovecha la circunstancia de que la cámara posee cierta "memoria". Los electrones y los iones que integran la traza no se van ni se recombinan

de inmediato. Después de haber suministrado la tensión, en la huella de la partícula comienzan a desarrollarse las avalanchas, éstas se transforman en "streamer" y entre las placas salta la chispa. La chispa repite la trayectoria de la partícula si la última no formaba un ángulo demasiado grande con la dirección del campo en la cámara. Una vez terminado el impulso de alta tensión, también termina la descarga. ¿De qué modo la electrónica obtiene la señal de que llegó el momento de enviar a las láminas la alta tensión? Con este fin, delante de la cámara (y, a veces, por detrás), en dirección del vuelo de las partículas se colocan contadores de Geiger o de centelleo. Éstos registran la partícula y la señal sobre este acontecimiento pone en funcionamiento el sistema de alimentación de alto voltaje de la cámara de chispas. De ordinario, la cámara está construida de tal forma que los electrodos se encuentran en un recipiente con gas, con la particularidad de que una pared del recipiente es transparente. Entonces, se pueden fotografiar las chispas originadas al pasar la partícula y, utilizando varios intervalos de descarga, observar su huella (fig. 19). De este modo, la cámara de chispas pertenece al tipo de detectores que permite observar la trayectoria de la partícula. Dichos detectores llevan el nombre de los *de trazas*.

En una serie de experimentos la cámara se introducía en un campo magnético, este último desviaba la huella de la partícula y por las fotografías se podía determinar su impulso. En los primeros experimentos con los neutrinos realizados en el acelerador los físicos hicieron uso de la cámara de chispas, y ésta les ayudó a descubrir otra "sorpresa" relacionada con v . Antes de proceder a relatar estos experimentos pongamos al lector al corriente de los problemas discutidos.

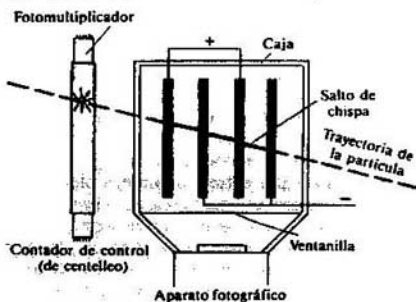


FIG. 19. Esquema de principio de una cámara de chispas.

3.5. HIPÓTESIS SOBRE DOS TIPOS DE NEUTRINOS

Desde 1937, cuando en la composición de la radiación cósmica los físicos descubrieron la segunda partícula elemental, el mesón μ (la primera, el positrón, como recordará el lector, fue descubierta en los rayos cósmicos un lustro antes), transcurrieron muchos años. Su detección no fue tan inesperada para los experimentadores como la aparición del positrón. Los científicos desde hace mucho tiempo sospechaban que la componente dura de la radiación cósmica constaba de cierto tipo desconocido de partículas con carga unitaria.

Lograron demostrar este hecho. A continuación, en el curso de diez años, aproximadamente, el mesón μ ocupó entre las partículas elementales un lugar ajeno, a raíz de que se consideraba que ésta es, precisamente, la partícula vaticinada por Yukawa que transfiere la interacción nuclear. Por fin, en 1947, fue descubierto el mesón π que resultó ser cuanto de estas fuerzas. Y el mesón μ se quedó simplemente como analogía pesada del electrón ($m_\mu \approx 205m_e$) creado por la naturaleza con una finalidad todavía incomprensible. Los científicos investigaron atentamente la reacción de su desintegración, durante la cual se engendran partículas β , neutrinos y antineutrinos. Por ejemplo, para un muón positivo se tiene:

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu + \bar{\nu},$$

$$(-1) \rightarrow (-1) + (+1) + (-1).$$

Por debajo de los símbolos de las partículas participantes en la reacción se insertan los valores de sus cargas leptónicas. Antes y después de la desintegración la suma de los números es idéntica de acuerdo con la ley de conservación de la carga leptónica. Parecería que la desintegración en un positrón y dos neutrinos no es la única posibilidad para el mesón μ . También se sometían a examen los siguientes procesos:

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \gamma, \quad (43)$$

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + e^+ + e^-. \quad (44)$$

En estos procesos no se infringen ningunas leyes de conservación y lo único que los diferencia de la reacción descrita anteriormente es que el neutrino y el antineutrino tuvieron tiempo para aniquilarse (43) o engendrar el par electrón-positrón $e^+ e^-$ (44).

Los teóricos evaluaron la probabilidad W de los procesos (43)

y (44). Resultó que, por ejemplo,

$$K = \frac{W(\mu \rightarrow e + \gamma)}{W(\mu \rightarrow e + \nu + \bar{\nu})} = 10^{-3} \dots 10^{-4}.$$

Comenzó la búsqueda de estos procesos. Los buscaban, pero no los encontraban. Las restricciones respecto al valor de K disminuían cada vez: menor de 10^{-4} ; menor de 10^{-5} ; 10^{-7} ^{*)}, etc. La naturaleza, obstinadamente, prohibía al muón desintegrarse en electrón y cuanto gamma.

Y precisamente para explicar esta prohibición los físicos supusieron que existen dos tipos de neutrinos: uno es concomitante del electrón (ν_e), y el otro, del muón (ν_μ). Durante la desintegración del neutrón y del mesón π^- se engendran diferentes antineutrinos:

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e, \quad (45)$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu, \quad (46)$$

y la reacción de desintegración del mesón μ debe escribirse en la forma

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \bar{\nu}_\mu + \nu_e. \quad (47)$$

En este caso, en vez de una carga leptónica pueden introducirse dos: la electrónica, l_e , y la muónica, l_μ , así como dos leyes de la conservación: $\sum l_e = \text{const}$ y $\sum l_\mu = \text{const}$. La tabla presenta los valores de estas cargas para los distintos leptones.

Partícula	l_e	l_μ
e^-	1	0
e^+	-1	0
ν_e	1	0
$\bar{\nu}_e$	-1	0
μ^-	0	1
μ^+	0	-1
ν_μ	0	1
$\bar{\nu}_\mu$	0	-1
Las demás partículas	0	0

Ahora los procesos de desintegración del muón en positrón y cuanto gamma (43) o en electrón y dos positrones (44) serán pro-

^{*)} De acuerdo con los datos del año 1979, $K < 1,9 \cdot 10^{-10}$.

hibidos automáticamente por las nuevas leyes de la conservación.

La hipótesis podía convertirse en un hecho firmemente establecido tan sólo después de su confirmación experimental.

El experimento para estudiar la diferencia entre ν_e y $\bar{\nu}_\mu$ fue el primero entre los experimentos con los neutrinos realizados en aceleradores de altas energías. Su idea (pertenecía a B. Pontecorvo) sugería la posibilidad de observar la interacción de ν_μ con la sustancia (análogamente al experimento de Reines y Cowan para $\bar{\nu}_e$). Si durante la interacción de este tipo nacen muones y no se engendran electrones, este hecho servirá de demostración de que $\nu_\mu \neq \bar{\nu}_\mu$.

3.6. EXPERIMENTOS CON LOS NEUTRINOS EN ACELERADORES

Con cuánta frecuencia hoy día se pueden escuchar las palabras: aceleración de las partículas, acelerador, acelerador gigantesco. Pero incluso en el vocabulario de los físicos estas palabras aparecieron hace relativamente poco. Una vez más la historia nos hace retornar al año 1932, el año de oro de los experimentos. Precisamente este año dos físicos jóvenes, J. Cockroft y E. Walton, que trabajaban en el laboratorio de Rutherford desintegraron el núcleo de litio-7 utilizando protones acelerados hasta energías de 600 a 700 keV. Hablando con propiedad, la idea misma consistente en que en el campo eléctrico las partículas cargadas se podían acelerar hasta altas energías se discutía y se puso en práctica en varios laboratorios.

Con diez años de anterioridad a estos acontecimientos, en Petrogrado, que todavía no se había restablecido del hambre y el desbarajuste provocados por la guerra civil en Rusia, fue fundado el Instituto del Radio. El jefe de la Sección de Física de este Instituto, L. Misovski, junto con el estudiante V. Rukavishnikov propusieron acelerar las partículas alfa hasta varios millones de electronvoltios valiéndose de generadores de alta tensión. Siete años después, en el otro confin del mundo, en la Universidad de Princeton de los EE.UU., Van de Graaff creó un nuevo tipo, muy interesante, de generador electrostático. Éste permitía obtener una diferencia de potencial constante, al principio, de centenares de miles, y en los modelos ulteriores, de millones de voltios. Esta diferencia de potencial aplicada a un tubo de vacío podía acelerar iones de hidrógeno: protones, o iones de otros gases. Sin embargo, fueron precisamente Cockroft y Walton quienes, por primera vez, valiéndose de un acelerador, realizaron un descubrimiento en la física nuclear. Los protones irrumpían en el núcleo de litio-7, superando su resistencia culombiana

(ésta fue la causa de su aceleración), y lo "desgarraban", lo desintegraban. Como resultado de la reacción se formaban dos partículas alfa. Aunque, al crear su aparato, los investigadores ingleses trataban de reducir al máximo los gastos, utilizando en gran medida latas vacías de galletas y otros "trastos" de esta índole, sin embargo, así y todo, la máquina no resultó barata, ni mucho menos, y, como pensaban sus constructores, era muy voluminosa (costó 1000 libras esterlinas y ocupaba una habitación bastante grande).

El mismo año de 1932 el joven profesor adjunto de la Universidad de California E. Lawrence obtuvo un haz de protones acelerados hasta casi cuatro millones electronvoltios. El haz salía del primer acelerador anular, el ciclotrón, construido por este científico. En el acelerador las partículas se aceleraban por el campo eléctrico y el magnético torcía su trayectoria. De esta manera el haz podía pasar múltiples veces el intervalo acelerador. Se movía siguiendo una espiral plana, acumulando energía y aumentando el radio hasta que salía fuera de los límites del campo magnético. En los primeros modelos las dimensiones de las cámaras aceleradoras eran de 10, 12,5 cm. El acelerador fue montado empleando tubitos de vidrio, placas, lacre, etc. Luego, una compañía regaló al investigador un imán de 74 toneladas que iba cubriéndose de herrumbre en un almacén. Esto permitió acelerar los protones hasta 4 MeV.

De este modo el recién nacido aparato hizo su aparición al mundo. Y comenzó su avance a paso de gigante.

Cada cinco años las energías de las partículas aceleradas crecían, aproximadamente, 10 veces. Surgían originales ideas y, en pos de ellas, se creaban nuevos tipos de aceleradores. Las habitaciones se sustituían por salas, luego, por hangares. Llegó el tiempo en que solamente desde un avión era posible fotografiar el acelerador en su conjunto. La suma de 1000 libras esterlinas se completó con tal número de ceros a la derecha que la construcción de aceleradores llegó a estar al alcance tan sólo de los países más ricos. Pero también éstos se aúnan para crear nuevos gigantes.

Y en las máquinas más modernas se crean haces de neutrinos y se realizan experimentos con estas partículas: en el acelerador del Instituto de Física de Altas Energías (cerca de la ciudad de Sérpujov, en la URSS); en el sincrofasotrópico del Centro Europeo de Investigación Nuclear (Suiza); en el acelerador del Laboratorio Nacional Fermi (EE.UU.). Sin embargo, estos gigantes, en los cuales los protones se aceleran hasta la energía de centenares de miles de millones electron-voltios, aparecieron en la escena más tarde, ya después de que fueran realizados los primeros experimentos con los neutrinos. Mientras que, en aquella época, en 1962, los experimentos

llevados a efecto en el acelerador de Brookhaven (EE.UU.) parecían sorprendentes.

El haz de protones acelerados se desvía en un momento determinado por un potente impulso del campo magnético. Sale de la cámara del acelerador cayendo sobre el blanco que, habitualmente, se hace de berilio. Durante la interacción de los protones con la sustancia se engendran mesones π y K rápidos. Al salir del blanco y desintegrarse en pleno vuelo en un túnel de vuelo especial (por ejemplo, en el acelerador de Sérpujov éste es un tubo de vacío de cerca de 140 m de longitud), los mesones emiten neutrinos de alta energía: $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$; $\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$; $K^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ y $K^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$. A continuación, el haz de partículas incide sobre la protección pasiva. En Brookhaven para este fin se utilizó un blindaje desmontado de un viejo navío de guerra. El espesor de la protección constituía trece metros. Debido a ésta el flujo de partículas de interacción fuerte (π , K , p , etc.) disminuía 24 órdenes.

Los mesones detenidos en la protección, durante la desintegración, también emiten neutrinos. Entre éstos se encuentran también los electrónicos (por ejemplo, durante la desintegración de los mesones μ). Pero los últimos poseen una energía esencialmente menor que los nacidos durante el vuelo y no son importantes para el experimento realizado. Si existen dos tipos de neutrinos, el muónico y el electrónico, el acelerador es un manantial prácticamente puro de ν_μ y $\bar{\nu}_\mu$.

Ahora debemos señalar que los experimentos en el acelerador se diferencian mucho de los realizados en el reactor. Aunque en el primer caso el flujo total de neutrinos es muchos órdenes menor, las propias partículas poseen una energía miles de veces mayor. Y este hecho es muy importante por cuanto incrementa ostensiblemente la probabilidad de interacción del neutrino con la sustancia y se ofrece la posibilidad de investigar reacciones con un alto umbral de energía. Por ejemplo, durante la interacción con la sustancia de los neutrinos procedentes del reactor es imposible el nacimiento del muón, ya que la energía máxima de estos neutrinos es veinte veces menor que la masa en reposo del mesón μ , mientras que para los neutrinos del acelerador la relación es inversa. Por fin, la alta energía de las partículas permite luchar con éxito contra el fondo. En la escala energética el fondo de la radiactividad natural queda muy abajo. Las partículas cósmicas rápidas vuelan, en lo fundamental, verticalmente, y los productos de las reacciones neutrónicas lo hacen en un haz, en dirección del vuelo de ν_μ . Sin embargo, las ventajas enumeradas no convirtieron, en modo alguno, los experimentos con los neutrinos en un problema trivial. Estos experimentos requirieron crear unos detectores, únicos en su

género, capaces de dar cabida a una masa enorme de sustancia, así como distinguir un acontecimiento neutrínico del fondo y el mesón nacido del electrón.

Para registrar el neutrino se necesitó una voluminosa cámara de chispas más de diez toneladas de sustancia. Dicha cámara estaba constituida por diez secciones iguales, y por los lados y por arriba la rodeaban detectores de protección activa destinados a disminuir el fondo cósmico; cada sección, además, comenzaba y terminaba con contadores de arranque. Entre las secciones se interponían paralelamente diez placas de aluminio de $1,5 \text{ m}^2$ de área cada una. Las placas servían de electrodos y las separaban intervalos de descarga. El neutrino podía engendrar una partícula cargada ligera —un electrón o un muón en el material de las placas— y ésta, poseyendo gran energía, atravesaba varios intervalos de descarga. Para disminuir el fondo, sólo se tomaban en consideración los acontecimientos cuyas trazas se originaban en el interior de la sección, es decir, aquellos que se debían a una partícula neutra. Además, se seleccionaban las partículas que volaban formando un ángulo menor de sesenta grados respecto a la dirección del haz de neutrinos.

Los muones podían distinguirse de los electrones por los chaparrones característicos de partículas secundarias surgidas en la cámara. Se registraron 34 acontecimientos mesónicos que respondían a todos los criterios de la selección. Entre éstos, cinco, pudieron haber aparecido a costa del fondo cósmico. En el caso de que $v_e \equiv v_\mu$, el número de acontecimientos producidos por los electrones también debería llegar a unos treinta. Pero éstos no se observaron. Este hecho permitió a los autores llegar a la conclusión de que existen dos tipos de neutrinos. En el experimento de Brookhaven la estadística no era grande. Debido a ello, al cabo de un año este experimento fue repetido en el Centro Europeo de Investigación Nuclear donde también fue utilizada una cámara de chispas de muchas toneladas. Los experimentos confirmaron los resultados de Brookhaven en miles de acontecimientos registrados.

Capítulo 4

DESINTEGRACIÓN BETA DOBLE.

CONTADORES A BASE

DE SEMICONDUCTORES

4.1. ESPECIALIZACIÓN

En el siglo XX los físicos se dividieron definitivamente en teóricos y experimentadores. Y esta división se profundiza cada vez más. Tanto en la física experimental, como en la teórica aumenta el número de direcciones. Y a los especialistas en rayos cósmicos y en sólidos les resulta difícil comprender unos a otros. La causa es de todos conocida y consiste en el volumen colosal de conocimientos ya acumulado y que sigue creciendo como una bola de nieve rodando cuesta abajo. Cada vez con mayor frecuencia se puede oír o leer que en nuestros días, en el campo teórico, ya no aparecerá un nuevo Landau, ni, tanto más, un físico como Fermi. Un conocido físico norteamericano escribió al respecto: "Pasaron los tiempos de Faraday con su Andersen ^{*)} y de Rutherford con su Key ^{**)}. Llegó el tiempo de los esfuerzos colectivos. Deplorar este hecho significa deplorar la segunda ley de la termodinámica. Pero esto no quiere decir que no puede haber científicos de brillante individualidad. Cambió el carácter mas no el valor de la preparación, en las universidades, de semejantes científicos físicos..."

De este modo resulta que el joven que emprende el camino de la ciencia debe hacer una elección. Existe una multitud de causas personales (y no personales) que condicionan su formación como teórico o experimentador. Por supuesto, que a nadie se le prohíbe cambiar de especialidad, pero semejantes cosas ocurren raras veces. Según he observado, los teóricos se convierten en experimentadores con mayor frecuencia que al revés. Sin embargo, en esta opinión podía repercutir la parcialidad del autor del presente libro. Es que en el folklore físico existe la leyenda sobre un científico (teórico de categoría mundial, uno de los discípulos favoritos de Landau) que muy decididamente interrumpió su carrera experimental.

Cuentan que cuando preparaba su tesis de graduación tenía que poner a punto su primera instalación, en cuyo interior debía mantener el vacío. El asunto no cuajaba, de ningún modo: en la instalación

^{*)} Asistente de M. Faraday.

^{**)} Asistente de E. Rutherford. Según las palabras de este último: "el mejor asistente de laboratorio en el Imperio Británico".

penetraba aire, ésta, como se dice, "goteaba" ora en un lugar, ora en otro. Sus compañeros ya se acostumbraron al incesante golpeteo de la bomba de vacío y, al salir del trabajo, veían la luz del laboratorio encendida hasta altas horas de la noche. Transcurrían las semanas, pero la situación seguía sin cambios esenciales.

Así seguían las cosas hasta que, un buen día, del laboratorio llegó un estruendo y el resonar de vidrios rotos. La gente que acudió precipitadamente encontró al joven físico sentado en el suelo en medio de cascotes de vidrio y trozos de hierro. Sonreía apaciblemente y sujetaba en la mano un martillo. En respuesta a las preguntas el futuro académico declaró que decidió, con firmeza, dedicarse a la teoría.

En el tercer curso del instituto los futuros físicos comienzan a especializarse en diferentes campos de esta ciencia. Se han creado distintas cátedras para aquellos quienes se dediquen a los experimentos y para los que se ocupen de la creación de detectores. Esto es comprensible. Todo el mundo se ha acostumbrado ya a que los modernos experimentos físicos son imposibles sin instrumentos complejísimo. Con frecuencia estos instrumentos y aparatos son de dimensiones enormes (recuérdense aunque sea las cámaras de trazas en los aceleradores) y, además, su creación y el trabajo en los mismos requiere la participación no sólo de físicos, sino también de ingenieros, técnicos y científicos de otras especialidades. La naturaleza revela sus secretos cediendo ante la pujanza de los esfuerzos mancomunados. Es muy demostrativo el siguiente ejemplo. El artículo describiendo el experimento con los neutrinos en Brookhaven, del cual hablamos en el capítulo anterior, lo firmaron siete autores. Llevaban la primacía entre éstos Lederman y Schwartz. Pasaron varios años, y un número tan pequeño de autores, tratándose de un trabajo dedicado a los experimentos con los neutrinos en el acelerador, se convirtió en un hecho raro. Ya se hizo habitual una lista de nombres que ocupa un cuarto de página impresa. En el descubrimiento de las corrientes neutras en la interacción débil (sobre estas corrientes hablaremos más adelante) participaron: en un trabajo, 55 coautores; en otro, 51.

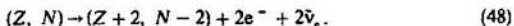
Así pues, la creciente especialización está relacionada también con el aumento de sus colectivos dentro de cuyas posibilidades está resolver los complicados problemas experimentales. Por supuesto, quedaron también problemas muy interesantes que requieren no una participación masiva, sino, más bien, ingenio e inventiva. Uno de estos problemas ya hace mucho que martiriza a los físicos: surgió poco tiempo después de la aparición en la escena del neutrino. Los experimentos que los físicos realizaban para resolver este problema se distinguían por la aplicación de los más variados detectores y unas

metodologías inesperadas. Por cuanto dichos experimentos no requerían gastos exorbitantes, invitaban a investigadores de los más diversos países. Y los resultados... Pero no viene al caso adelantarnos.

4.2. CUANDO DEL NÚCLEO SALEN DOS ELECTRONES

La predicción de este proceso está relacionada con el nombre de María Goeppert-Mayer, teórico que hizo una gran aportación a la física nuclear. Aproximadamente un año después de que E. Fermi formulara la teoría de la desintegración beta, María Goeppert-Mayer publicó un trabajo en el que planteaba la posibilidad de este proceso.

Prestemos atención a la fig. 20 en la que se representan los estados energéticos fundamentales de tres núcleos (isóbaros) con un consecutivo número de neutrones decreciente y un número de protones creciente: (Z, N) ; $(Z + 1, N - 1)$ y $(Z + 2, N - 2)$. La desintegración beta del primer núcleo para formar el segundo está prohibida por la ley de la conservación de la energía ya que el estado fundamental del último se encuentra más arriba en la escala de energías. En cambio, la desintegración beta del primero en el tercero no viene prohibida por esta ley. El proceso puede tener la siguiente forma:



Dos neutrones del núcleo se transforman simultáneamente en protones, con la particularidad de que en este caso salen leptones. Este proceso lleva el nombre de *desintegración beta doble*.

Atrajo la atención de los físicos porque podía servir para comprobar la ley de la conservación de la carga leptónica. Sigamos el curso de sus razonamientos. La reacción (48), en principio, puede tener dos mecanismos internos *).

El primero es la transformación independiente de neutrones en

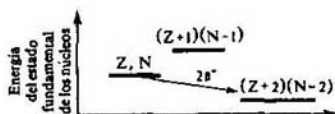


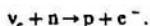
FIG. 20. Niveles energéticos de tres núcleos.

*) B. Pontecorvo propuso también un tercer mecanismo, muy interesante, al que no nos referiremos.

protones:



Ahora, por un rato, supongamos que la ley de la conservación de la carga leptónica no existe. En este caso se hace posible el segundo mecanismo para la desintegración beta doble. Durante la transformación del primer neutrón no sale un antineutrino, sino un neutrino. Y éste, como un catalizador, provoca la desintegración del segundo neutrón:



Esta reacción sólo se desarrolla con la participación virtual de ν_e . En lugar de cuatro leptones escapan dos: únicamente electrones



Se entiende que el experimento de Davis dedicado al estudio de la desintegración beta inversa del Ar-37 ya convenció a los físicos de que no se podía esperar una infracción considerable de la ley de conservación de la carga leptónica. Pero, digamos, ¿una infracción parcial? Si se logra registrar el proceso (50) esto tendrá consecuencias muy importantes, ya que en los últimos tiempos, en relación con el problema de la "Gran Unificación" de las interacciones (de la débil, electromagnética y nuclear) se discute el problema sobre una alteración —aunque ínfima, pero, así y todo, una alteración— de la conservación de las cargas bariónica y leptónica. (Ya hemos tocado esta cuestión al hablar sobre la posible inestabilidad del protón.)

Al confrontar entre sí las reacciones (48) y (50) se puede ver cómo distinguir la desintegración con dos neutrinos de la desintegración sin neutrinos. En el último caso la energía total de los electrones siempre será constante: ésta se determina tan sólo por la diferencia de energías de los estados fundamentales de los núcleos (Z, N) y ($Z + 2, N - 2$). A su vez, en el primer caso los electrones poseen un espectro de energías continuo, puesto que se emiten, además, dos antineutrinos.

Cabe señalar, también, que la desintegración sin neutrinos debe transcurrir con mucha mayor celeridad. Aproximadamente, un millón de veces más rápido si ν_e y $\bar{\nu}_e$ hubieran sido idénticos. Y si la ley de la conservación de la carga leptónica se infringe en 1% de casos, entonces, diez mil veces más rápido, etc. A raíz de ello, el experimentador que demostró la existencia de la desintegración sin

neutrinos, podía obtener la evaluación de la exactitud de esta ley, es decir, la relación entre el tiempo de vida del núcleo vaticinado por la teoría, siendo absolutamente idénticos el neutrino y el antineutrino, y el tiempo de vida obtenido por vía experimental:

$$\tau_{\text{teor}}(v_e \equiv \bar{\nu}_e)/\tau_{\text{exp}}.$$

Si se analiza la tabla de los isótopos se puede encontrar cerca de un centenar de núcleos susceptibles de experimentar, supuestamente, la desintegración beta doble. Sin embargo, por muchas causas, la mayoría de éstos no les sirve a los experimentadores. Después de una selección dejaron menos de diez isótopos.

Los primeros experimentos fueron realizados hace mucho tiempo. Desde aquella época grupos de físicos en todo el mundo más de una vez reanudaron la búsqueda de este proceso. La frontera de la exactitud se apartaba cada vez más y ahora se encuentra en la región de tiempos τ_{exp} mayores de 10^{21} años. Esto significa que en un gramo de sustancia inicial puede transcurrir una desintegración por año. Y es necesario saber detectar tales actividades.

Como es lógico, se impone la idea de tres caminos posibles: quedarse sentado y aguardar durante muchos años, aumentar la masa de la sustancia, o bien, hacer lo uno y lo otro. Y, además, con todo ello, saber suprimir los procesos de fondo.

4.3. EXPERIMENTOS GEOLÓGICOS

Varios grupos de experimentadores (entre éstos también algunos físicos soviéticos) hallaron un camino original, gracias al cual el tiempo de espera dura miles de millones de años. Se sobreentiende que los propios científicos todo este tiempo no estuvieron presentes. Simplemente, elegían un mineral (cuya edad fuera comparable con la de la Tierra) que tuviese el isótopo precursor (Z, N), o sea, el isótopo inicial, y buscaban en él los átomos del producto (hijo) ($Z + 2, N - 2$) acumulados allí durante este enorme lapso. De esta forma se investigaban las transiciones del selenio-82 en criptón-82, y del telurio-130 en xenón-130. Precisamente los gases inertes criptón y xenón se podían separar con relativa facilidad del mineral, incluso si su contenido en éste resultaba microscópico.

La muestra se trituraba y los gases se dirigían a un instrumento especial, el espectrógrafo de masa. En éste tenía lugar la determinación de la composición isotópica del gas inerte. Por regla general, se descubría que esta composición se diferenciaba de la común y corriente que se encuentra en la naturaleza. Por ejemplo, en uno de los últimos y sumamente escrupulosos experimentos se

sometía a investigación una mena con alto contenido de telurio. Se descubrió un exceso muy grande de xenón-130; su proporción constituía un 70% de la cantidad total de xenón, mientras que en la atmósfera su contenido es tan sólo de 4%. Por cuanto en la composición isotópica del gas extraído no se dejaron ver otras anomalías, era natural suponer que este exceso fuese el resultado de la desintegración beta doble del telurio-130 que transcurrió con una vida igual a 10^{21} años. Los físicos demostraron también que ^{130}Xe no pudo haberse formado por efecto del bombardeo de la mena con partículas cósmicas en el curso de casi mil quinientos millones de años (la muestra tenía esta edad).

La existencia de la desintegración beta doble se confirmó también por otros experimentos geológicos (éstos se denominan también espectrométricos de masa). Sin embargo, los experimentos no podían revelar de cuál desintegración, precisamente, se trataba: de la desintegración con dos neutrinos o de la desintegración sin neutrinos, pero muy moderada. De este modo, la cuestión sobre el mecanismo de la desintegración quedó sin resolver.

La respuesta a este interrogante sólo podía obtenerse en experimentos directos en los cuales se observaran los productos de la desintegración. Como ya hemos señalado, en el caso de que la suma de energías de dos electrones registrados hubiera sido constante e igual a la energía liberada durante la desintegración, esta circunstancia habría señalado la existencia del proceso sin neutrinos y la infracción de la ley de la conservación de la carga leptónica. Los experimentos directos se llevaron a cabo con los más diversos tipos de detectores: la cámara de Wilson, emulsiones fotográficas, cámara de chispas, contadores de centelleo y contadores a base de semiconductores.

Desde el año 1951 hasta la fecha los investigadores aumentaron la sensibilidad de los experimentos, aproximadamente, cien mil veces! En el curso de estos años, en varias ocasiones, pareció que la desintegración sin neutrinos ya se había descubierto. Mas al cabo de poco tiempo, los experimentos efectuados con los mismos isótopos pero con una mayor precisión refutaban estos resultados optimistas.

La máxima evaluación para el tiempo de vida de los núcleos respecto a la desintegración sin neutrinos se consiguió en los trabajos del grupo de físicos italianos bajo la dirección de E. Fiorini. En el ejemplo de estas investigaciones ilustraremos el trabajo de los contadores de radiación confeccionados a base de semiconductores. Pero, primeramente, expondremos el principio con que se registran las partículas en estos detectores.

4.4. CONTADOR A BASE DE SEMICONDUCTORES

Los contadores de centelleo son casi coetáneos del siglo veinte. A los cinco años comenzó a trabajar también el detector de descarga de gas. El lejano prototipo de las cámaras de chispas, el contador de chispas de Keiffel, fue creado en 1948. Los detectores a base de semiconductores no tienen más edad, seguramente, que los lectores de este libro. Una fecha tan tardía de nacimiento se debe a causas técnicas pues para la producción de estos detectores se necesitan materiales superpuros: germanio y silicio. Los químicos aprendieron a cultivar los cristales, casi carentes de impurezas, de estos elementos tan sólo unos veinte años atrás.

Examinemos ahora el modelo más simple de contador a base de semiconductores constituido por dos cristales semiconductores de diferentes tipos. Uno de éstos contiene cierta cantidad de electrones que se desplazan libremente por el cristal. Es el semiconductor del tipo n (de la palabra "negativo").

En el otro, los electrones sólo pueden saltar entre los átomos más próximos. En este caso, por el cristal se desplaza un sitio vacante equivalente a una carga positiva (la falta de carga negativa es una carga positiva). Esta vacancia lleva el nombre de "hueco". La conducción por huecos es característica para los semiconductores del tipo p (de la palabra "positivo"). De este modo, dos cristales de diferentes tipos están unidos en uno. El uno posee huecos móviles, y el otro, electrones. Semejante combinación recordará la unión de dos cajas con distintos gases. Comenzará a desarrollarse la difusión. Los huecos se dirigirán hacia el semiconductor con la conducción por electrones y, viceversa, los electrones irán al cristal del tipo p . Puesto que el gas de electrones y huecos es un gas cargado, se engendra un campo eléctrico que iniciará la oposición a la difusión ulterior. Los portadores de la carga abandonarán la zona de contacto de los cristales y esta zona, como se dice, resultará empobrecida en carga. Dicha zona lleva el nombre de unión $p - n$ (o bien, $n - p$). Si al cristal se aplica, adicionalmente, una tensión eléctrica de tal modo que aumente todavía más la diferencia de potencial entre los semiconductores p y n , la zona empobrecida se ensanchará.

Precisamente la unión $p - n$ es la parte principal del contador a base de semiconductores. Ésta es equivalente a la cámara de ionización con la única diferencia de que contiene un relleno sólido. Aquí es pequeña la cantidad de cargas libres, y a falta de radiación ionizante fluye tan sólo una corriente térmica insignificante. La última es tanto menor cuanto mayor es la resistencia del semiconductor (¡he aquí la razón por la cual se requiere la pureza de los materiales!)

y cuanto más baja es la temperatura del cristal. La partícula cargada, al pasar, ioniza los átomos, y en la unión $p-n$ aparecen cargas libres. El campo las "estira" en diferentes sentidos y la señal eléctrica que se engendra en este caso puede registrarse.

La propiedad de los contadores a base de semiconductores que más atractivo tiene para los físicos es la posibilidad de determinar con una precisión muy grande la energía perdida por la partícula en la zona de la unión $p-n$. Un buen poder de resolución energético. Mucho mejor que el de los detectores de centelleo o de las cámaras de ionización gaseosa. Para muchos problemas es importante que durante el registro de las partículas de energías próximas se separen — se resuelvan — las señales provenientes de éstas. Por este motivo, los contadores semiconductores, apenas creados, comenzaron a emplearse muy ampliamente.

En cuanto al inconveniente principal de estos detectores, éste consiste en la pequeña cantidad de sustancia en el volumen sensible, de modo que no son idóneos para registrar partículas de altas energías con recorrido grande.

La señal del paso de la partícula en el detector es pequeña. Así, por ejemplo, la partícula α con una energía de 3,5 MeV forma en la transición $p-n$ una carga igual a $1,6 \cdot 10^{-13}$ culombios. Si la capacidad del detector es de 100 pF, el impulso de tensión en la salida será $u = Q/C = 1,6 \cdot 10^{-3}$ V. Con el fin de medir con gran precisión una señal de esta índole se necesitó construir amplificadores especiales con un nivel bajo de ruidos propios.

Además, para reducir los ruidos del propio detector, los contadores de germanio se enfrían hasta temperaturas muy bajas, empleando para ello nitrógeno líquido.

De lo expuesto se ve que los detectores a base de semiconductores es conveniente utilizarlos para determinar la energía de las partículas alfa o de los fragmentos de la fisión de elementos pesados. Con esta finalidad, la unión $p-n$ se dispone muy cerca de la superficie del contador, a la profundidad de varias micras, para que la partícula no gaste en balde su energía en el material de este instrumento. Valiéndose de un sistema de dos detectores de silicio se puede hallar también la masa del fragmento. El esquema del experimento tiene el siguiente aspecto: En el camino de los fragmentos se interpone el primer contador, cuyo espesor Δx es solamente de unas decenas de micras, de modo tal que la partícula en vuelo deje en éste sólo una parte pequeña de su energía. Si volvemos a la fórmula (19) (véase la pág. 41), veremos que en la distancia Δx las pérdidas de energía $-\Delta E/\Delta x$ son inversamente proporcionales al cuadrado de la velocidad de la partícula. El segundo contador se elige bastante "gor-

do" (de varios milímetros), de modo que en su unión $p-n$ la partícula se absorba por completo. Éste sirve para la determinación de la energía $E = 1/2mv^2$. El producto $(\Delta E/\Delta x)E$, para una carga conocida del fragmento (éstos, de la fisión, salen ionizados), depende solamente de su masa. Y esta masa es posible de hallar. De este modo, entre los productos de la fisión se descubrieron isótopos con propiedades nucleares muy interesantes. Por ejemplo, el isótopo de helio no con dos, sino con seis neutrones, o sea, el helio-8. Durante la fisión del californio-252 muy pesado, por cada millón de fragmentos salidos se encuentran dos o tres núcleos de helio-8 (y miles de núcleos de helio-4 ordinario). Por cuanto el isótopo pesado está tan recargado de neutrones, éste se desintegra en una décima parte de segundo irradiando electrones.

Los detectores de germanio se emplean con frecuencia para la espectrometría gamma. Aunque dichos instrumentos requieren enfriamiento, las dificultades técnicas se ven compensadas por la mucha mayor eficacia del registro: tanto Z del germanio, como su densidad superan en alto grado las mismas magnitudes para el silicio.

4.5. EL EXPERIMENTO DE FIORINI

Al principio de este capítulo hemos dicho que en los experimentos dedicados al estudio de la desintegración beta doble las instalaciones experimentales no sorprenden por sus dimensiones. Por ejemplo, la cámara de chispas y los contadores de centelleo en el experimento de Bardeen, Wu y otros tenían una longitud de cerca de dos metros. Pero la instalación fue bajada a una mina de 600 m de profundidad para protegerla de la radiación cósmica.

Los experimentos del grupo de Fiorini con el detector de germanio se realizaron en el Laboratorio Internacional de los Rayos Cósmicos.

Bajo el más alto de los picos alpinos, el Monte Blanco, pasa un túnel de casi doce kilómetros de largo que une Italia y Francia. A cuatro kilómetros de distancia de la salida italiana del túnel se encuentra el Laboratorio de los Rayos Cósmicos. Por arriba lo protegen cerca de dos kilómetros de rocas; este espesor, de acuerdo con los cálculos de los físicos, es equivalente a más de cuatro kilómetros de agua. Una protección tan potente debilita millones de veces el flujo de muones cósmicos. En la fig. 21 se puede ver el esquema de la instalación en la cual trabajó el grupo italiano.

La protección exterior —la parafina— retarda los neutrones rápidos que nacen de la interacción de los muones con la sustancia o están relacionados con la desintegración de elementos radiactivos naturales. Tras la parafina se encuentra una capa de cadmio,

"absolutamente negra", es decir, que absorbe totalmente los neutrones lentos. Contra los cuantos gamma lucha una protección de plomo. Al principio se dispone una capa de plomo corriente, pero éste, por sí mismo, puede contener impurezas de uranio o torio. Además, con el desarrollo de la industria atómica y de los ensayos atómicos muchos materiales resultaron "contaminados" por la radiactividad. Para el hombre esta radiactividad pasa completamente inadvertida ya que es centenares y miles de veces menor que el fondo natural, sin embargo, puede resultar peligrosa para instalaciones de fondo tan bajo. Éste es el motivo de que la capa interior de plomo es especial, con un nivel bajo de radiactividad. A menudo, este plomo se obtiene de las planchas de dicho metal que cubrían los techos de los antiguos edificios (iglesias o castillos). En los siglos transcurridos los elementos radiactivos contenidos en el plomo de estas planchas tuvieron tiempo para desintegrarse, y, por otra parte, estas planchas no podían haberse "contaminado" de los materiales modernos. La última capa de la protección pasiva es una de mercurio purificado múltiples veces por destilación. Y finalmente, el corazón de la instalación es el detector de germanio.

A través del conducto de frío la baja temperatura, desde el vaso de Dewar con nitrógeno líquido, se transmitía al cristal de germanio. Este cristal desempeñaba un papel doble. Por una parte servía de detector de los electrones que se formaban, y por otra era su manantial. La cuestión reside en que el germanio natural contiene cerca de 7,5% de germanio con un peso atómico igual a 76. Éste puede

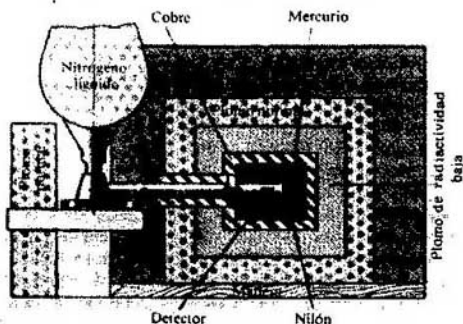


FIG. 21. Esquema de la instalación del grupo de Fiorini con cuya ayuda se buscó

la desintegración beta doble del germanio-76.

transformarse en selenio-76 con la irradiación de dos electrones (en el caso de desintegración sin neutrinos su energía total es de 2 MeV).

Para los experimentos se logró cultivar un cristal único en tamaño y pureza de 68 cm^3 de volumen. Dicho cristal poseía un excelente poder de resolución energético. En sus trabajos, el grupo de Fiorini presenta el espectro energético de los acontecimientos registrados: numerosos picos provenientes de diferentes elementos radiactivos. Pero en la región de los 2 MeV, siendo el tiempo total de observación igual a 187 días (!), no se observó pico alguno. Esta circunstancia dio la posibilidad de afirmar que, aun cuando la desintegración doble sin neutrinos transcurra, ésta se produce con una vida que sobrepasa los $5 \cdot 10^{21}$ años. La ley de la conservación de la carga leptónica no se infringe con mayor frecuencia que en el 0,1% de los casos.

Actualmente, a la búsqueda de la desintegración beta doble se dedican cerca de diez grupos, incluyendo los de físicos soviéticos. Los científicos que trabajan en Kiev y en el Laboratorio Neutrónico de Baksán ya han obtenido resultados de alta precisión. Pero, lamentablemente, todavía no han detectado este proceso.

Capítulo 5

CÓMO "ESTÁ ESTRUCTURADA"

LA INTERACCIÓN DÉBIL

5.1. ES HORA DE HACER BALANCE

Transcurrieron cincuenta años —un plazo que se acerca a la duración de la vida humana— desde el día en que Enrique Fermi, por primera vez, dio a la nueva partícula el cariñoso nombre italiano: "neutrino". Durante estos años los físicos se afanaron por no perder en balde el tiempo. Lograron sonsacar a la naturaleza muchos secretos relacionados con el neutrino. Resultó que muchas propiedades de esta partícula primero fueron vaticinadas y más tarde obtuvieron confirmación experimental. Esto se refiere tanto al propio hecho de la existencia del neutrino, como a la circunstancia de que en la naturaleza se dan dos tipos diferentes de esta partícula: el neutrino muónico y el electrónico. Hace muy poco (no hemos hablado aún sobre el particular) se ha añadido a éstos el neutrino tau (ν_τ) que acompaña en las reacciones al leptón τ descubierto en el acelerador. Si se toma en consideración que cada una de las mencionadas partículas tiene, además, su respectiva antipartícula, resulta que el número de miembros conocidos de la familia del neutrino llega a seis. No hay plena claridad en la cuestión de para qué necesita la naturaleza seis partículas invisibles (y según las opiniones más pesimistas, en general, no existe claridad alguna).

Los físicos inventaron el término "carga leptónica" y proveyeron cada partícula ligera —cada leptón— con su propio marbete. De este modo, aparecieron símbolos complementarios en las designaciones de los diferentes neutrinos: ν_e , $\bar{\nu}_e$, ν_μ , $\bar{\nu}_\mu$. Las investigaciones han demostrado que la ley de la conservación de la carga leptónica se cumple con gran exactitud. Por ahora, su infracción no se reveló ni siquiera en los experimentos más meticulosos.

También se verificó otra predicción que, a primera vista, parecía sumamente inverosímil. Como recordará el lector, los experimentos han confirmado el hecho de que la interacción débil no conserva la paridad espacial. Los procesos que dicha interacción gobierna transcurren de distinta forma en nuestro mundo y en el reflejado especularmente. A resultas de ello, en las páginas de las revistas aparecieron las imágenes de los neutrinos en forma de bolita volando y girando alrededor de su vector velocidad o de barrena enroscándose en el espacio (véase la fig. 16). Ilustran el hecho de que el espín de la partícula está orientado en el espacio no de una manera arbitraria,

sino estrictamente en dirección (para $\bar{\nu}_e$ y $\bar{\nu}_\mu$) o estrictamente en contra de la dirección (para ν_e y ν_μ) del movimiento (del impulso). Por el momento, todos los experimentos llevados a cabo confirman este cuadro. Al mismo tiempo, queda todavía una enorme cantidad de trabajo y siguen siendo muy actuales las líneas conclusivas del libro del académico M. A. Márkov "El neutrino" escritas hace más de tres lustros: "A nuestro contemporáneo le es difícil adivinar cuál es el verdadero lugar que ocupará el neutrino en la física del futuro. Sin embargo, las propiedades de esta partícula son tan elementales y peculiares que es lógico pensar que la naturaleza ha creado el neutrino teniendo presente unos "fines" profundos y, por ahora, no muy claros para nosotros".

5.2. INTERACCIÓN

¿Y qué se sabe respecto a la interacción débil en la cual participa el neutrino? La conversación sobre este problema la comenzamos en la primera parte del presente libro (capítulo 7) y ahora trataremos de continuarla. Durante largo tiempo permanecía enigmático el mecanismo con cuya ayuda se realizaba esta interacción responsable de la desintegración de los mesones μ , π y K y de una serie de otras partículas, así como de la dispersión (por ejemplo, la dispersión del neutrino en el electrón).

El radio de acción de las fuerzas débiles es ínfimo incluso en comparación con la escala nuclear. Esta última constituye 10^{-14} m, y el primero es menor que 10^{-17} m. No es de extrañar que resultase muy difícil "discernir" cuáles partículas transfieren interacciones débiles, desempeñando el mismo papel que los cuantos gamma en la electrodinámica.

La teoría de la desintegración beta que publicó en 1934 E. Fermi hizo en este sentido tan sólo el primer paso. Ya hemos señalado que fue construida por analogía con la electrodinámica y, posteriormente, resultó que con plena razón. En cuanto al mecanismo de las fuerzas débiles, la teoría fermiana examinaba el proceso de transformación de los nucleones en el núcleo, así como el nacimiento de la partícula β y del neutrino como si fuese desde lejos, sin prestar interés a sus detalles. Se consideraba que todo se desarrolla en un punto. Semejante aproximación era válida mientras se trataba de la desintegración beta nuclear con sus energías relativamente pequeñas (< 10 MeV).

La respuesta definitiva a la pregunta sobre los cuantos del campo débil fue obtenida después de haberse creado la teoría única de las interacciones electromagnéticas y débiles. A esta teoría aportaron su

trabajo numerosos científicos, entre los cuales el papel principal pertenecía a S. Weinberg, Sh. Glashow y A. Salam.

La acción se desarrolla en una región del espacio miles de veces menor que el núcleo atómico. Aquí, la desintegración beta del neutrón tiene el aspecto representado en el diagrama de la fig. 22, a. El neutrón, al transformarse en protón, irradia una partícula, el cuanto del campo débil, que lleva el nombre de "bosón vectorial" (W^-). Esta partícula transporta una carga negativa y se desintegra en electrón y neutrino. El radio de la interacción débil es pequeño, y esto significa que la masa del bosón W es muy grande (del orden de 10^5 MeV), de conformidad con lo discutido ya en la pág. 70. El segundo miembro de la familia de los bosones vectoriales W^+ se puede ver en el siguiente diagrama que representa la desintegración del muón positivo μ^+ (fig. 22, b). Finalmente, en la teoría surgieron dos bosones más, esta vez, neutros. Pero éstos no se ponen de manifiesto por separado, sino siempre en combinación con el otro. Su desplazamiento da lugar, en primer término, a la partícula neutra Z^0 de masa grande, y, en segundo término, el cuanto gamma que ya conocemos con la masa en reposo igual a cero. Mientras las distancias entre las partículas son pequeñas, el intercambio de W^- , W^+ , Z^0 o de cuantos γ conduce a igual fuerza de interacción. En ello se manifiesta la naturaleza única de las fuerzas débiles y electromagnéticas. Éstas intervienen con la carga e , que es única por su magnitud y está relacionada mediante la expresión $G \sim e^2/M_W^2$ con la constante de Fermi de interacción débil y la masa del bosón. Pero he aquí que la distancia entre las partículas se hizo mayor que el radio de las interacciones débiles. Ahora el intercambio de bosones virtuales está dificultado. El principio de incertidumbre prohíbe a estas partículas de masa grande una existencia duradera y la probabilidad de que penetren a grandes distancias es muy pequeña. En este caso llevan ventaja los cuantos gamma que no poseen masa. Las interacciones electromagnética y débil, únicas por su naturaleza, miradas "desde fuera", parecen representar diferentes tipos de fuerzas.

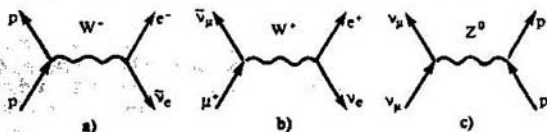


FIG. 22. a) La desintegración del neutrón se desarrolla mediante el bosón vectorial intermedio (corriente de carga); b) desintegración del muón positivo

(corriente de carga); c) proceso de dispersión del neutrino en el protón. Se realiza por medio del intercambio del bosón neutro (corriente neutra).

El éxito de la teoría única radicaba en que ésta podía resolver otros muchos problemas complejos cuya exposición nos hubiese llevado muy lejos del contenido de este libro. Los procesos que se pueden explicar por medio del intercambio de bosones cargados W^- y W^+ se habían observado y estudiado antes de la creación de una teoría única ^{*)}. Dicha teoría, meramente, permitió enfocarlos bajo un nuevo ángulo. Pero en lo que respecta al bosón pesado neutro, el esquema de Salam - Weinberg predijo tanto su existencia, como toda una serie de procesos con la participación de Z^0 que no se observaron todavía en el experimento (fig. 22, c). Estas reacciones obtuvieron el nombre de procesos con "corrientes neutras", por cuanto Z^0 no transporta carga ^{**)}.

5.3. CÁMARAS DE BURBUJAS

La teoría vaticinaba la existencia de corrientes neutras, y era asunto de los experimentadores someter este vaticinio a comprobación experimental. La verdad es que incluso con anterioridad en las interacciones débiles se buscaban corrientes neutras, sin embargo, estas búsquedas no se vieron coronadas con el éxito. Pero ahora, otra vez, todo el mundo se sentía lleno de entusiasmo. A mediados de 1973, en la prensa apareció una comunicación del Centro Europeo de Investigación Nuclear (aquella misma comunicación que firmaron 55 físicos de 7 institutos y seis países diferentes: RFA, Bélgica, Suiza, Francia, Italia e Inglaterra) informando que las corrientes neutras se habían descubierto. Se logró hacerlo utilizando detectores de los cuales todavía no hemos dicho nada: se trata de las cámaras de burbujas. Éstas están interpuestas en el camino de los haces engendrados en los más grandes aceleradores del mundo. Muchas de las cámaras llevan nombres bonitos: "Mirabel", "Liudmila", "Gargamel", etc. Sin embargo, los nombres femeninos no encubren, ni mucho menos, una "complexión" sutil. Por ejemplo, las dimensiones propias de la "Mirabel" son de 1,6 m de diámetro y 4,7 m de alto. Esta cámara fue elaborada por científicos e ingenieros franceses y montada en el acelerador del Instituto de Física de Altas Energías (Sérpujov) para la labor conjunta con los

^{*)} Los propios bosones vectoriales no fueron observados por nadie.

^{**)} En 1982-1983, dos grupos de físicos que trabajan en el Centro Europeo de Investigación Nuclear (CERN) en el acelerador de altas energías observaron bosones cargados y neutros y determinaron sus masas. Estas últimas se encuentran en perfecta concordancia con los pronósticos teóricos.

físicos soviéticos. La cámara está rodeada de aparatos auxiliares, su volumen se mide en decenas de metros cúbicos y la masa es de cerca de 3000 toneladas. Aquí hay imanes a través de cuyos polos se han practicado canales para fotografiar los acontecimientos, hay instalaciones especiales en los cuales se obtiene hidrógeno líquido que llena la cámara, y un sinnúmero de otros instrumentos.

Las cadenas de burbujas que marcan la huella de la partícula que pasó volando o nació se fotografían con varios aparatos. Esto se hace para restablecer después dicha huella en el espacio, según las tres coordenadas. Seguidamente, las fotografías se envían para su procesamiento. La cámara, en un día, puede proporcionar decenas de miles de fotografías. Y millones de fotografías, anualmente, en todo el mundo. Fotografías, fotografías, fotografías. Aún recientemente miles de personas en los laboratorios, en mesas especiales, analizaban las fotografías a través de microscopios de proyección ^{*)}. Aquí se llevaba a cabo la selección primaria de los acontecimientos que interesaban a los físicos. A continuación, entraban en acción instalaciones automatizadas y semiautomatizadas unidas a ordenadores rápidos. Es preciso medir las longitudes de las trazas, restablecer el aspecto espacial de los acontecimientos y muchas, muchísimas cosas más. Al fin y al cabo, los investigadores obtienen la información necesaria y pueden construir gráficos, realizar cálculos, confirmar algo y algo refutar. El costo de este procesamiento, junto con la creación de los aparatos indispensables en este caso se mide en números de siete y ocho guarismos, resultando más costoso que las propias cámaras de burbujas. Existe, además, otro problema. El procesamiento se queda a la zaga de la información suministrada por las cámaras. Y éstas deben estar paradas una parte de su tiempo, o bien, trabajar para el "archivo". ¡¿Y lo que representa mantener tales archivos?!

Las dificultades son muchas, pero qué enorme paso adelante permitieron hacer a la física las cámaras de burbujas desde la época en que el joven colaborador de la Universidad de Michigan Donald Glaser construyera la primera cámara. No tenía nada que espantara. Su parte principal la constituía una ampolla de vidrio llena de éter cuyo volumen era tan sólo de $2,5 \text{ cm}^3$. El líquido se encontraba a una temperatura de 130°C y una presión de 20 atm. Luego, por medio de un dispositivo especial, la presión se reducía a la normal.

Una vez hecho esto el éter se encuentra en estado sobrecalentado.

^{*)} Actualmente, se automatizan también las primeras etapas del procesamiento.

¿Qué significa esto? Para que comience la ebullición del líquido, además de la temperatura y presión correspondientes, es necesario también crear las condiciones para la formación de burbujas de vapor. Se conoce que los químicos desde hace mucho tiempo utilizan con este fin trozos cortados de tubos de vidrio o de porcelana colocados en el fondo del matraz. O sea, los llamados "ebulidores". En éstos aparecen burbujas, y la ebullición transcurre sin percances enojosos. Si no se recurre a estas medidas de precaución calentando líquido puro, liberado de gas, entonces, al alcanzar la temperatura de ebullición y seguir aumentándola sucesivamente, el vapor se formará tan sólo en la superficie. El líquido se encuentra en estado sobrecalentado. Finalmente, como resultado de la aparición dentro de éste de cierta irregularidad, las burbujas podrán formarse. El proceso se desarrolla de una forma violentísima y, muy a menudo, el tapón se dispara hacia el techo, y el matraz, hacia el investigador.

En la cámara de Glaser el papel de "ebulidores" se asignaba a los iones formados en la huella de la partícula. Durante unas cuantas milésimas de segundo las burbujas se acrecentaban hasta dimensiones visibles. En este lapso a los iones no les daba tiempo desplazarse a una distancia perceptible, y la cadenita de burbujas coincidía exactamente con la traza de la partícula. Después de haber fotografiado la huella se puede comprimir el líquido por medio de un émbolo, las burbujas desaparecerán y el instrumento de nuevo estará preparado para el trabajo.

Las primeras fotografías del muon que atravesó la cámara fueron publicadas en 1953. A partir de este momento tomó una marcha muy rápida el diseño y construcción de diferentes tipos de cámaras de burbujas. Su ventaja incuestionable era evidente: el blanco poseía una cantidad grande de sustancia y, por consiguiente, una gran probabilidad de interacción entre ésta y la radiación penetrante. Como líquidos se utilizaban el hidrógeno líquido y el deuterio líquido, así como líquidos de composición más compleja: el propano y los freones. En el transcurso de diez años las dimensiones de las cámaras incrementaron hasta un metro. Y la siguiente década condujo a la creación de verdaderos gigantes, hablando de los cuales comenzamos nuestro relato.

Las cámaras trabajan sincrónicamente con los impulsos del acelerador. El líquido se encuentra en un campo magnético intenso, circunstancia (al igual que el carácter de la huella) que permite obtener la información más completa posible sobre la partícula.

5.4. CORRIENTES NEUTRAS

Retornemos ahora al experimento con los neutrinos. Un haz de neutrinos muónicos, al pasar la cámara de burbujas "Gargamel"^{*)} llena con diez toneladas de freón, entraba en interacción con la sustancia y engendraba partículas secundarias. Hacia el verano de 1973 se acumularon centenares de miles de fotografías y de éstas se eligieron las relacionadas con los neutrinos. Las fotografías seleccionadas se subdividieron en dos grupos. En el *primer* grupo se incluyeron los procesos en los cuales, entre los productos de la reacción se identificaban leptones cargados: los muones μ^+ o μ^- . Su aparición está relacionada con las corrientes cargadas en las cuales como transportadores de la interacción débil intervienen los bosones W^+ o W^- . En el segundo grupo se incluyeron las reacciones que no van acompañadas del nacimiento de leptones cargados (véase, por ejemplo, la fig. 22, c). El número de acontecimientos de este tipo resultó poco menor que el de los del primer grupo, y esto era un testimonio convincente de la existencia de corrientes neutras y del bosón Z^0 . Este experimento confirmaba las predicciones teóricas, pero los físicos no se sentían tranquilos. Una teoría de carácter tan fundamental debía comprobarse y recomprobarse de la manera más escrupulosa y en los más variados experimentos. Y los experimentos volvían a realizarse: en aceleradores, en reactores, en laboratorios.

En un local especial, a una distancia de 11 mm de la zona activa del reactor de Savannah-River (2000 MW), se encontraba una instalación con cuya ayuda los físicos norteamericanos encabezados por F.

Reines descubrieron la existencia de las corrientes neutras. Cada segundo, por 1 cm² de superficie de esta instalación incidía un flujo de $2 \cdot 10^{13}$ antineutrinos. Dicho flujo debía pasar, primeramente, a través de la protección pasiva compuesta de plomo y cadmio, después, atravesar un recipiente con más de dos toneladas de material centelleante líquido, o sea, la protección activa. Y, finalmente, los antineutrinos alcanzaban la parte central donde 10 contadores proporcionales de gas, llenos de helio-3, atravesaban un recipiente con 250 litros de agua pesada extraordinariamente pura. A diferencia del agua corriente en cuya composición entra el isótopo ligero de hi-

^{*)} El nombre de la cámara se ha tomado de la novela de F. Rabelais "Gargantúa y Pantagruel". Gargamel es la madre de Gargantúa.

drógeno ${}^1_1\text{H}$, en el agua pesada éste viene sustituido por el deuterio ${}^2_1\text{H}$.

El núcleo de este último que consta de un protón y un neutrón lleva el nombre de "deutón" (o deuterón) y se designa con d . Hagamos recordar al lector que el "destino" del deuterón es, en muchos aspectos, análogo al del neutrón. Su existencia fue vaticinada por Rutherford en 1920, y el descubrimiento experimental de estas partículas se remonta al año 1932. El neutrón fue descubierto en Inglaterra, y el deuterón, en los Estados Unidos por el grupo de Harold Urey. Obtuvo su reconocimiento definitivo en el VII Congreso de Solvay que dio también el "certificado de nacimiento" al neutrino. Y he aquí que ahora dichas partículas deben volver a entrar en contacto, pero esta vez no en el sentido figurado, sino en el literal.

¿Qué ocurrirá en este caso?

La reacción puede desarrollarse por dos canales. Uno de éstos viene determinado por corrientes cargadas y consiste en que el protón que entra en la composición del deuterón se transforma en neutrón y positrón:



Si las corrientes neutras existen, es posible también un proceso en que el antineutrino incidente rompe, descompone el deuterón en sus partes integrantes, liberando el protón y el neutrón:



En ambos casos los experimentadores debían registrar los neutrones: dos, si tenía lugar la reacción (51), y uno, cuando el deuterón, simplemente, se descomponía. Con este objetivo, precisamente, los contadores de helio atravesaban el agua pesada. Se hacía uso de su propiedad principal: el registro eficaz de los neutrones, siendo al mismo tiempo ínfima su sensibilidad frente a la radiación gamma. El fondo propio de estos contadores está relacionado, fundamentalmente, con las partículas alfa de radiactividad natural que escapan de sus paredes. El experimento que exponemos fue realizado en 1979.

No era, ni mucho menos, el primero entre los efectuados en reactores con el fin de buscar las corrientes neutras. La búsqueda comenzó a partir de 1956, pero en aquella época la sensibilidad de la instalación resultó ser casi cien mil veces menor que la necesaria. Hubo que cambiar la metodología, y en 1969 este número disminuyó hasta mil, mientras que en 1974 quedaba por aumentar la sensibilidad

tan sólo 10 veces. Una vez más los investigadores reconstruían la instalación. En los experimentos del año 1979, en más de 100 días de mediciones del efecto y del fondo se obtuvo que el número de acontecimientos originados por las corrientes neutras era de cerca de 40 por día, y el de los debidos a las corrientes cargadas, aproximadamente 7 por día. El orden de estas cifras coincidía con los pronósticos de la teoría.

Capítulo 6

NUEVAS IDEAS Y NUEVOS DETECTORES

En los últimos años el número de nuevas ideas, hipótesis y proyectos de experimentos referentes a los neutrinos lejos de reducirse, aumentó considerablemente. Incluso una enumeración breve de los mismos bastaría para llenar las últimas páginas de este libro. Por eso, como es lógico, debemos obrar de acuerdo con la fórmula "más detalles sobre pocas cosas" y no "un poco de todas las cosas". En este capítulo, sólo trataremos tres problemas: las oscilaciones neutrónicas, el proyecto DUMAND y los proyectos de la utilización práctica de los neutrinos.

6.1. ¿OSCILA EL NEUTRINO?

En este libro hemos hecho mención de muchos nombres de eminentes físicos. Sin embargo, entre todos éstos no se ha mencionado todavía aquel que puede llamarse fundador de la ciencia sobre las oscilaciones, y con más razón aún, padre de toda la física experimental. El lector habrá adivinado ya que se trata de Galileo Galilei. Entre las numerosas cualidades relevantes del gran físico italiano destaca también el que él sabía observar los fenómenos más simples que a todo el mundo parecían comunes y corrientes, y, basándose en estas observaciones, hacer descubrimientos trascendentales. Por lo visto, así fue también el caso con las oscilaciones del péndulo.

Por su antigüedad es imposible comprobar la leyenda sobre el joven científico de la Universidad de Pisa quien, presenciando un oficio en la majestuosa catedral, observaba el vaivén de las lucernas, las grandes arañas de bronce con velas. Observaba y calculaba el tiempo que necesitaba la araña para su movimiento en ambas direcciones; más tarde este tiempo recibió el nombre de período de oscilación. Galileo no tenía a mano ningún reloj: ni de arena, ni de agua, ni otro cualquiera, y para comparar los períodos de oscilación de las arañas suspendidas con cadenas de distinta longitud se valía de su propio pulso. Si, es imposible comprobar la leyenda, pero se puede leer en las obras de Galileo sobre los péndulos y sobre los experimentos con bolitas de plomo y de corcho suspendidas con hilos de una misma longitud. Sus períodos de oscilación T no se diferenciaban unos de otros. Dependían tan sólo de la longitud del hilo: $T \sim \sqrt{l}$. Este fue, precisamente, el comienzo de la ciencia sobre

las oscilaciones. En la segunda mitad del siglo XVII Huygens dedujo la ecuación total para el período de oscilación del péndulo:

$$T = 2\pi\sqrt{l/g},$$

donde l es la longitud de la suspensión, y g , la aceleración de la gravedad (de la caída libre). La teoría de las oscilaciones se tornaba cada vez más extensa, describía cada vez mayor cantidad de fenómenos de los más diversos campos y su aparato matemático se hacía cada vez más complejo. Resultaba poco tratar con un solo péndulo y el investigador unía con un muelle (no demasiado rígido) dos péndulos, como lo representa la fig. 23. Actualmente, este experimento lo exhiben, con gusto, tanto en la escuela, como en las conferencias en los auditorios de los institutos; es sencillo y hermoso, y a nosotros nos hace falta para seguir nuestro relato. Entonces, vamos a observar. Al principio dos péndulos iguales cuelgan inmóviles unidos mediante un muelle. El asistente desvía uno de ellos. El primer péndulo comienza a oscilar con mayor amplitud, pero, paulatinamente, la amplitud de sus oscilaciones va disminuyendo, en cambio, incrementa cada vez más la amplitud de las oscilaciones del segundo. Llega un momento en que el primero, prácticamente, se para, mientras que el segundo oscila con amplitud máxima. A continuación el cuadro varía, y la alternación prosigue hasta que las oscilaciones se extingan debido a la fricción.

Se pueden escribir las ecuaciones diferenciales de estos procesos, las ecuaciones pueden resolverse, obteniéndose la descripción matemática del cuadro que acabamos de exponer. Dichas ecuaciones son universales en el sentido de que describen el comportamiento de cualesquiera sistemas de este tipo, sea de péndulos, de dos circuitos oscilantes en un esquema eléctrico, o, simplemente, de dos sistemas: sistema I y sistema II. Hacen constancia del hecho de que si los sistemas I y II son independientes, entonces, los procesos periódicos

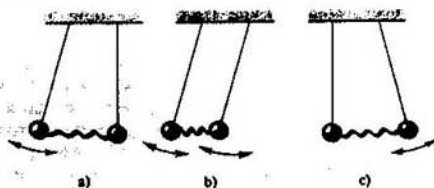


FIG. 23. Péndulos unidos balanceándose. Su movimiento se define por las

mismas ecuaciones que las oscilaciones neutrónicas.

en éstos también son independientes. Pero, apenas entre los sistemas aparece cierto vínculo débil, cierta interacción, se origina un proceso que tan bien podemos observar en el ejemplo de los péndulos. La energía pasa del sistema I al sistema II, y del II al I, también realizando oscilaciones.

Ahora conviene hacer un salto en el tiempo, trasladándonos a los años 60 del siglo XX cuando este aparato matemático tuvo su aplicación para el neutrino. La idea sobre la posibilidad de las oscilaciones neutrónicas^{*)}, al igual que otras muchas ideas en la física de las interacciones débiles, pertenece a B. Pontecorvo. Analicémosla en el siguiente ejemplo. Supongamos que de la zona activa del reactor nuclear sale el antineutrino electrónico $\bar{\nu}_e$. Si la ley de la conservación de la carga leptónica es absolutamente exacta, al antineutrino no le pasará nada. Este corresponde al sistema I, y, digamos, el antineutrino muónico $\bar{\nu}_\mu$, al sistema II, con la particularidad de que estos sistemas existen independientemente. (Con mayor exactitud, el segundo sistema en el reactor simplemente no existe.) Pero si los "unimos mediante un muelle", es decir, suponemos que se da una interacción que infringe a veces dicha ley, entonces, resultará posible la transición $\bar{\nu}_e \rightleftharpoons \bar{\nu}_\mu$, o sea, las oscilaciones neutrónicas. El flujo de antineutrinos electrónicos comenzará a representar, paulatinamente, cierta mezcla de $\bar{\nu}_e$ y $\bar{\nu}_\mu$, a continuación, quedarán sólo $\bar{\nu}_\mu$ ^{**)} , luego, se iniciará una transición inversa, etc. Todo se desarrolla como en el caso de los péndulos ligados. Para que las oscilaciones se produzcan es indispensable otra condición importante. El neutrino debe tener una masa aunque pequeña, pero, de todos modos, finita, y, por consiguiente, $v_\nu < c$. De lo contrario, incluso en el caso de infracción de la ley de la conservación de la carga leptónica, las transiciones entre las diferentes especies de neutrinos resultarán prohibidas por la teoría de la relatividad.

Descubrir las oscilaciones neutrónicas es de sumo interés. Su existencia no sólo significaría que la ley de la conservación de la carga leptónica reviste carácter aproximado y no sólo que el neutrino posee masa. Este fenómeno indicaría también que la naturaleza nos ha regalado otro efecto extraordinariamente hermoso y que el hombre ha sabido predecirlo. He aquí cómo se ha tendido el hilo del

^{*)} En un principio, las oscilaciones de los neutrinos fueron introducidas por B. Pontecorvo por analogía con las oscilaciones de los mesones K neutros. Pero no hablaremos acerca de éstos últimos debido a que con el desarrollo de esta idea se pusieron de manifiesto muchas particularidades interesantes inherentes tan sólo a las oscilaciones neutrónicas.

^{**)} En algunas condiciones la transición puede no ser completa.

conocimiento entre el siglo XVI y el XIX. Desde las lucernas balanceándose hasta las enormes instalaciones contemporáneas.

Y ahora, siguiendo las tradiciones elaboradas en este libro, el autor debería pasar a la descripción del experimento en el que los físicos registraron el nuevo efecto. Pero no puede hacerlo. Y por una causa muy justificada. Hasta la fecha, nadie ha observado dichas oscilaciones.

Existe una serie de datos indirectos que impulsan a los físicos a realizar su búsqueda. Ante todo, se trata del "defecto" de los neutrinos solares. Como ya hemos dicho, la magnitud de su flujo que se registra en los experimentos del grupo de Davis es menor que la esperada de conformidad con los cálculos astrofísicos. Es posible que esta circunstancia esté relacionada con errores de este difícilísimo experimento. Puede ser que sea conveniente corregir otra vez los cálculos. Pero si la diferencia existe objetivamente, se puede esperar que en su camino desde el Sol hacia la Tierra parte de los neutrinos ν_e se transforme en $\nu_\mu(\nu_\tau)$. Estos últimos no serán capaces de transformar los átomos de cloro-37 en argón-37. Por supuesto, este problema se esclarecerá con el tiempo. Probablemente, después de entrar en funcionamiento la segunda etapa del laboratorio neutrínico de la Academia de Ciencias de la URSS situado en el desfiladero de Baksán. Los nuevos detectores de neutrinos solares permitirán contestar con mayor exactitud a la pregunta acerca de la existencia de las oscilaciones.

Así pues, la búsqueda continúa. Varios grupos de experimentadores se ocupan de las mediciones en los reactores o se preparan para tales mediciones. Son los físicos norteamericanos de la Universidad de Irvine, en California (el grupo de F. Reines), los científicos europeos del Instituto de Laue-Langevin en Grenoble (el grupo encabezado por el laureado con el Premio Nobel Rodolfo Mössbauer) y los investigadores soviéticos. La idea del experimento consiste en lo siguiente. Un detector capaz de registrar el proceso de desintegración beta inversa $\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$ se sitúa no muy lejos del reactor. Si las oscilaciones tienen lugar con suficiente rapidez y su longitud es de metros o decenas de metros, entonces, parte de las partículas $\bar{\nu}_e$, en su recorrido hasta el detector, se transformará en $\bar{\nu}_\mu$. El neutrino muónico no provoca la reacción de desintegración beta inversa. El detector no los "percibe". En este caso, el número de acontecimientos registrados disminuirá en comparación con los pronósticos de la teoría. Una prueba todavía más convincente y palmaria de la existencia de las oscilaciones puede obtenerse midiendo el espectro de energía de los positrones provenientes de la desintegración beta (γ , por consiguiente, también de los antineutrinos

incidentes) a diferentes distancias del reactor nuclear. El quid de la cuestión consiste en que los $\bar{\nu}_e$ poseedores de gran energía, para convertirse en $\bar{\nu}_\mu$ deben recorrer también una distancia mayor que los antineutrinos con pequeña energía. Los últimos se "extinguen" más rápidamente. Y, al alejar el detector, los experimentadores podrán observar cómo disminuye el número de positrones con pequeña energía respecto a los e^+ de energía grande.

Los físicos del Instituto de Laue-Langevin llevaron a cabo este experimento haciendo uso de una plataforma de ferrocarril en marcha, en la cual había sido montada su instalación de muchas toneladas de peso. La búsqueda de las oscilaciones de Pontecorvo se efectúa también en laboratorios subterráneos profundos donde se registran neutrinos nacidos en la atmósfera, así como en aceleradores de altas energías. Se discutió un proyecto en el que se suponía emplazar el detector a una distancia de cerca de mil kilómetros del acelerador. El acelerador se encuentra en los Estados Unidos (Batavia), y el detector, en el Canadá. Debido a que el haz de neutrinos de alta energía es lo suficientemente estrecho, se puede esperar el registro del flujo de estas partículas. Semejante experimento permitiría advertir oscilaciones de una longitud muy grande.

¡Nos queda esperar los resultados!

6.2. PROYECTO DUMAND

Los físicos obtenían y obtienen los conocimientos fundamentales sobre la estructura de la materia valiéndose de las partículas de grandes energías. Los científicos se afanan por penetrar más lejos aún en la profundidad de la sustancia y para lograr su finalidad la bombardean en los aceleradores con protones, mesones y neutrinos de energías cada vez mayores. Ya se están diseñando y, en el futuro próximo, van a construirse máquinas en las cuales los protones se acelerarán hasta energías de varios TeV ($1 \text{ TeV} = 10^6 \text{ MeV} = 10^{12} \text{ eV}$). Sin embargo, ésta no es, ni mucho menos, una solución simple del problema, ni, por supuesto, barata. Ya hemos señalado que la construcción de los gigantescos aceleradores, con frecuencia, supera las posibilidades de un solo país, incluso de uno desarrollado. A raíz de ello los físicos, asimismo, no dejan desatendido aquel "acelerador gratuito" que funciona continuamente en el Universo enviando a la Tierra flujos de partículas cósmicas rápidas. ¿Dónde tienen éstas su origen? Actualmente, los científicos consideran que como manantial de partículas cósmicas pueden intervenir las explosiones de estrellas de gran masa. Las enormes temperaturas y presiones producidas durante la explosión expulsan al Universo la sustancia de la estrella con una

nuclear y tanto más barato y seguro se puede construir el reactor. ¿Y cómo enterarse de todo ello? ¿De qué modo es posible echar una ojeada al interior del aparato donde reinan enormes radiactividades, altas temperaturas y, con frecuencia, alta presión? Están elaborados y se emplean los más variados detectores. Estos registran la radiación, pero deben estar situados en las proximidades de la zona activa del reactor, la zona en que tiene lugar la reacción en cadena de la fisión. Por cuanto más lejos todas las partículas son absorbidas por una protección especial, pues es necesario detener el "fuego nuclear". Sí, se absorben todas las partículas a excepción del neutrino. Éste penetra libremente a través de la protección y, como han demostrado los físicos soviéticos, porta una información interesante acerca de aquello que se desarrolla en la zona activa. El detector dispuesto a varias decenas de metros de dicha zona verá las "entrañas" del reactor en la "luz neutrínica".

Los físicos soviéticos que trabajan en el laboratorio neutrínico de la central atómica de Rovno están realizando ahora este proyecto. Ya han obtenido resultados esperanzadores. Es posible que en un futuro muy próximo el hombre, por primera vez, obtenga un servicio práctico del neutrino.

Todo ello, precisamente, ayudará a distinguir los acontecimientos útiles entre los demás. Por enorme que sea la masa de agua por encima del detector, también aquí, a pesar de todo, pueden penetrar los muones de energías ingentes.

Otro método, completamente insólito, de registración de los neutrinos de energías muy altas fue propuesto por G. A. Askarián y B. A. Dolgoshein. Los científicos decidieron que el neutrino no sólo se puede "ver" (por medio de los fotomultiplicadores), sino también "oír". O, más exactamente, oír el sonido procedente del chaparrón de partículas cargadas formado por la acción del neutrino. El gran desprendimiento de energía en el chaparrón conduce al calentamiento local instantáneo del agua, al crecimiento de su volumen y a la propagación en la profundidad del océano de ondas sonoras. Si bien la luz, según las evaluaciones de los científicos, se absorbe en el agua del mar a una distancia de varias decenas de metros, el sonido se propaga más lejos. Y en uno de los proyectos se propone crear en el océano una instalación que incluye cien mil hidrófonos sensibles dispuestos en forma de red cúbica. La distancia mínima entre dos hidrófonos es de 100 m. Las dimensiones del detector son $10 \times 10 \times 1 \text{ km}^3$ (la profundidad es de 1 km). Siendo así, su masa superará cien veces la del detector de Cherenkov, y será de 10^{11} t , de modo que se puede esperar "oír" durante un año un millar de neutrinos con energías superiores a 10^{16} eV . Para cada acontecimiento va a funcionar un promedio de 50 hidrófonos. La registración acústica permite determinar la energía de ν (la intensidad del sonido es proporcional a la liberación de energía en el chaparrón), el lugar de origen del chaparrón y la dirección del neutrino.

La duración del impulso del sonido es extraordinariamente pequeña, circunstancia que también contribuirá a distinguirla entre otros ruidos del mar.

Es cuestión del futuro la forma en que se presentará la instalación definitiva del proyecto DUMAND y los datos interesantes que se lograrán obtener sobre el neutrino y sobre el Universo por medio de éste. Esperaremos que este futuro no será muy lejano.

6.3. LA PRÁCTICA Y EL NEUTRINO

Las más diversas especialidades ya han "asimilado" y siguen "asimilando" las partículas elementales. Hace mucho nos hemos acostumbrado a que el campo de aplicación de la física nuclear ha llegado a ser casi inabarcable. Comenzando por las colosales centrales eléctricas y terminando con la criminalística o el problema del corazón artificial. Mientras, que el neutrino, una de las pocas

partículas estables (además del neutrino, no se desintegran el electrón, el protón, el cuanto gamma y sus antipartículas), no sirve, de ningún modo, para las necesidades prácticas. En este camino la naturaleza creó una barrera: la probabilidad ínfima de interacción del neutrino con la sustancia. Una barrera que durante muchos años parecía insuperable. Se sobreentiende que el trabajo referente a la creación de detectores de neutrinos fue útil para otros campos de la física o de la técnica: basta recordar los detectores líquidos de centelleo de gran volumen y el problema de determinación de la radiactividad del hombre. No obstante, todo ello no eran sino méritos circunstanciales. Solamente en los años más recientes surgieron ideas debido a las cuales los "inconvenientes" del neutrino podían devenir en "méritos". Una metamorfosis con que nos enfrentamos no solamente en el mundo de las partículas elementales.

Hagamos mención tan sólo de uno de los proyectos. Este está relacionado con los problemas de la energética nuclear. Hoy en día todo el mundo conoce y considera habituales las palabras "energética nuclear". Es difícil imaginar que solamente unos decenios nos separan del momento en que los físicos comenzaron a reflexionar sobre la posibilidad de transformar la energía de la fisión del uranio en térmica y eléctrica. Por regla general, un asunto nuevo provoca dudas en mucha gente y, con frecuencia, también oposición. Así sucedió también en esta ocasión.

El académico A. P. Alexándrov recordaba: "Ya en 1948, al resolver el problema del uranio surgían ideas sobre el desarrollo de la energética atómica. En aquella época, en el mejor de los casos, esta idea provocaba sonrisas. Se consideraba que no es sino un "entretenimiento" de los científicos que jamás tendría sentido práctico". Pero, a pesar de todo, Igor Vasilievich Kurchátov, sus colaboradores y discípulos tenían fe en que el átomo pacífico era necesario a los hombres, y demostraron su razón. La primera central eléctrica atómica, de una potencia muy pequeña: de 50 mil kilovatios, comenzó a trabajar en el verano de 1954. La construyeron no lejos de Moscú, en la ciudad de Obninsk. Transcurrieron años, y la nueva fuente de energía iba conquistando cada vez mayor reconocimiento. Actualmente, en el mundo funcionan ya centenares de centrales atómicas y la potencia de cada una de éstas se calcula en cientos y miles de megavatios.

La nueva rama de la energética requiere de los científicos e ingenieros el más amplio conocimiento posible de cómo transcurre la producción de la energía y qué se opera en el interior del reactor atómico. Es que cuanto más completos y precisos son estos datos, tanto más económicamente se puede gastar el costoso combustible

velocidad próxima a la de la luz. Este proceso viene acompañado de una colosal fulguración cuando la luminancia visible de la estrella incrementa miles de millones de veces. Los astrónomos dicen: "Estalló una supernova". J. Kepler, por ejemplo, en 1604, observó semejante erupción en la constelación del Serpentario. Desafortunadamente, el primero de los telescopios fue construido en Holanda cinco años más tarde, luego, apareció el antejo de Galileo y tan sólo en 1611 Kepler dio la descripción del telescopio de su propia invención. Hoy en día los asuntos han tomado otro cariz. Los potentes telescopios nos acercan las galaxias más lejanas, y las supernovas se registran, en término medio, una vez en varios meses (cerca de 400 erupciones en los últimos 90 años).

Los rayos cósmicos, por sus energías, adelantan, a veces, hasta los proyectos fantásticos de aceleradores. En aquéllos se encuentran, en ocasiones, partículas con energía que supera los 10^{20} eV. Durante la interacción de las partículas con la sustancia interestelar (o con las moléculas de aire en la atmósfera de la Tierra) nacen también neutrinos de energías superaltas. Por supuesto, las partículas rápidas son muy pocas y, en correspondencia, es ínfima la intensidad de los neutrinos engendrados con $E_\nu = 10^{13} \dots 10^{16}$ eV (en comparación con el haz originado en el acelerador). Pero, sea como fuere, solamente los neutrinos de energías superaltas son capaces de traernos información sobre las regiones lejanas del Universo. Pues, para alcanzarlo, es necesario salvar distancias de miles de millones de años-luz sin ser absorbidos por la sustancia interestelar. Además, valiéndose de los neutrinos cósmicos, es posible estudiar la interacción de estas partículas con la sustancia en condiciones de enormes energías.

Ahora, si el lector ha leído este libro atentamente (lo que el autor le agradece), él puede jugar consigo mismo en una especie de "acertijo". Por ejemplo, nombrar, por analogía con lo anterior, tres requisitos que deben satisfacer los detectores de neutrinos cósmicos y sin cuyo cumplimiento no puede obtenerse el éxito. Y en el acto comprobar las respuestas.

1. Enorme masa de la sustancia.
2. Buena protección contra el fondo.
3. Aplicación de diferentes "ardides" para distinguir el acontecimiento debido al neutrino de otro cualquiera.

Peró es poco probable que el lector alcance a adivinar de qué masa puede tratarse. Es bastante difícil evaluar el flujo de neutrinos y la probabilidad de su registración. Mas con todo el optimismo no se debe aguardar un cuento mayor que el de varias unidades por un millón de años, para $E_\nu > 10$ TeV y una masa del detector igual a 1 t.

La decepción causada por esta cifra no puede mitigarse ni siquiera con los pronósticos más favorables sobre la longevidad humana. Procuremos soslayar esta dificultad abordándola por otro lado. Tomemos un millón de toneladas de material centelleante y varios millones de fotomultiplicadores. Sin embargo, aquí, además de dificultades técnicas surgirán también dificultades financieras insuperables. La fabricación de semejante detector valdrá un ojo de la cara. No obstante, los físicos no perdieron el ánimo, y como fruto de las reflexiones de los científicos apareció el proyecto de la detección en aguas profundas de muones y neutrinos, o sea, el proyecto DUMAND (las siglas de la expresión inglesa: *Deep Underwater Muon and Neutrino Detection*).

La posibilidad de detectar los neutrinos y muones en las profundidades del mar fue examinada en la Unión Soviética. Más tarde, en 1975, un grupo de físicos norteamericanos que trabajaban en diferentes universidades y en el Laboratorio Nacional de Aceleradores promovió un proyecto análogo que, precisamente, recibió el nombre de DUMAND. Seguidamente, en la URSS y en los EE.UU. comenzó su elaboración más detallada. Se formó un comité de organización y se convocan periódicamente conferencias internacionales que discuten los resultados de los cálculos, los experimentos de simulación y las ideas de detectores originales.

En 1977, la revista *Uspieji fizicheskij nauk* ("Éxitos de las ciencias físicas") publicó un resumen de V. S. Berezhinski y G. T. Zatsepin dedicado al DUMAND. Nos permitiremos aprovechar las descripciones allí insertadas de los proyectos de dos detectores. El primero es óptico. En el océano, a la profundidad de 5 km está situado un detector de $1 \times 1 \times 1 \text{ km}^3$ (10^9 t). Es una red cúbica con un espaciamiento de 15–20 m. En los nudos de la red se fijan los fotomultiplicadores. Se supone que el detector podrá instalarse en un valle oceánico en las cercanías de las Islas Hawaí. ¿Cómo se descubre un acontecimiento útil en esta instalación? El neutrino de energía superalta debe transmitir una parte considerable de su energía a otras partículas. Éstas, a su vez, entran en colisión con núcleos y electrones, engendran pares y emiten fotones. De este modo se forma un chaparrón nuclear-electromagnético. El conjunto de partículas secundarias vuela raudo en dirección del movimiento de la partícula inicial. Además, los electrones rápidos, presentes en el chaparrón, emiten la radiación de Cherenkov. Precisamente esta radiación es registrada por los fotomultiplicadores. Sabiendo de qué fotomultiplicadores llegaron las señales y cuál es su magnitud, se puede obtener la información tanto sobre la energía del neutrino, como sobre el lugar en que nació el chaparrón y sobre la dirección de su propagación.

TABLA DE LAS PROPIEDADES DE ALGUNAS PARTÍCULAS ELEMENTALES

Clase	Símbolo de la partícula	Masa en reposo, MeV	Espín en unidades $\hbar$	Tiempo de vida, s	Tipos de desintegración
Fotón	γ	0	1	Estable	
Leptones	$\nu_e, \bar{\nu}_e$	0	1/2	Estables	
	$\nu_\mu, \bar{\nu}_\mu$	0	1/2		
	e^-, e^+	0,511	1/2	Estables	
	μ^-, μ^+	105,66	1/2	$2,2 \cdot 10^{-6}$	$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$ $\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$
	π^-, π^+	139,57	0	$2,6 \cdot 10^{-8}$	$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ $\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$
Mesones	π^0	134,96	0	$0,8 \cdot 10^{-16}$	$\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$
	K^-, K^+	493,7	0	$1,2 \cdot 10^{-8}$	$K^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ $K^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^0$ $K^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$ $K^- \rightarrow \mu^- + \pi^0$
	$P, \bar{P}$	938,28	1/2	Estables	
Bariones	$n, \bar{n}$	939,57	1/2	15 minutos	$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$

Александр Александрович Боровой

КАК РЕГИСТРИРУЮТ ЧАСТИЦЫ

По следам нейтрино

Научный редактор Р. Михе

Редактор И. Ван Энгеланд

Художник А. Антонова

Художественный редактор Е. Подмарькова

Технический редактор М. Страцинова

Корректор Ю. Мурзин

ИБ № 4740

Сдано в набор 25.01.85.

Подписано к печати 05.07.85.

Формат 84 × 108¹/₃₂.

Бумага офсетная № 1.

Печать офсетная. Гарнитура таймс.

Объем 2,5 бум. л. Усл. печ. л. 8,4.

Усл. кр.-отт. 17,24. Уч. изд. л. 10,27. Изд. № 19/3078.

Тираж 13 390 экз. Зак. 88. Цена 82 коп.

ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР»

129820, ГСП, Москва, И-110, 1-й Рижский пер., 2.

Можайский полиграфкомбинат Союзполиграфпрома
при Государственном комитете СССР по делам
издательства, полиграфии и книжной торговли.
г. Можайск, ул. Мира, 93.